



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV CHEMIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF CHEMISTRY

KŘEMELINA - REAKTIVNÍ PŘÍMĚS DO CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ

INFUSORIAL EARTH - REACTIVE ADMIXTURE FOR CEMENT COMPOSITES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ŠTĚPÁN ZIMMERMANN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. RNDr. PAVLA ROVNANÍKOVÁ, CSc.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav chemie

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Štěpán Zimmermann
Název	Křemelina - reaktivní příměs do cementových kompozitů
Vedoucí bakalářské práce	prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2014
Datum odevzdání bakalářské práce	29. 5. 2015
V Brně dne 30. 11. 2014	

.....
doc. Ing. Jitka Malá, Ph.D.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- Degirmenci, N., Yilmaz, A. Use of diatomite as partial replacement for Portland cement in cement mortars. *Construction and Building Materials*, Vol. 23, 2009, 84–288.
- Yilmaz, B., Ediz, N. The use of raw and calcined diatomite in cement production. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 30, 2008, 202–211.
- Kastis, D., Kakali, G., Tsivilis, S., Stamatakis, M. G. Properties and hydration of blended cements with calcareous diatomite. *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 2006, 1821–1826.
- Loganina, V. I., Simonov, E. E., Jezierski, W., Małaszkiwicz, D. Application of activated diatomite for dry lime mixes. *Construction and Building Materials*, Vol. 65, 2014, 29–37.
- Csirik, G., Bedeleian, I., Pedersen, S. The influence of biogenic micro-silica-rich rocks on the properties of blended cements. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 25, 2003, 177–184.
- Dinh-Hieu Vu, Kuen-Sheng Wang, Bui Hoang Bac, Bui Xuan Nam. Humidity control materials prepared from diatomite and volcanic ash. *Construction and Building Materials*, Vol. 38, 2013, 1066–1072.

Zásady pro vypracování

Za použití doporučené literatury, a další literatury, získané rešerší ve světových vědeckých databázích, zpracujte krátkou stat' o původcích křemeliny a diatomitu a jejich rozmanitosti. Uveďte významná naleziště křemeliny a diatomitu a popište jejich vlastnosti. Pozornost věnujte dosud známým aplikacím ve stavebnictví, zejména při použití jako stavební pojivo s pucolánovými vlastnostmi a popište jejich využití i mimo oblast stavebnictví.

V experimentální části charakterizujte zadané druhy křemeliny chemickým složením, granulometrií a pucolánovou aktivitou. Vytvořte zkušební tělesa z jemnozrnného betonu s náhradou 10 % cementu zvolenými druhy křemeliny. Stanovte objemovou hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a v tlaku, výsledky porovnejte s výsledky stanovenými u referenčního vzorku bez křemeliny. Z experimentálních výsledků vyvoďte závěry. Výsledky zpracujte do přehledných tabulek a grafů, na konci práce uveďte soupis použité literatury. Bakalářskou práci zpracujte na cca 40 až 50 stran.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....
prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Předmětem bakalářská práce jsou vlastnosti a využití křemeliny jako částečné náhrady cementu v betonu. Jsou uvedeny informace o vzniku křemeliny sedimentací odumřelých rozsivek a rozmanitost těchto řas, včetně chemických a fyzikálních vlastností křemeliny dle původu. V práci jsou také uvedeny významná naleziště křemeliny, způsob a intenzita těžby včetně úpravy surové křemeliny pro další použití. Hlavním využitím křemeliny je v oblasti filtrace, která představuje více než polovinu celkové spotřeby. Důležitým faktorem pro využití ve stavebnictví je vysoký obsah amorfního SiO_2 a s ním spojená pucolánová aktivita křemeliny. V experimentální části je zkoumán vliv křemeliny jako pucolánové příměsi na vlastnosti cementových malt. Byla testována náhrada 10 % hmotnosti cementu v cementových maltách 3 filtračními křemelinami o rozdílném chemickém složení, granulometrii a pucolánové aktivitě. Hodnocenými parametry zatvrdlých malt byly objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Sledována byla také mikrostruktura malt. Výsledky zkoušek byly porovnány s hodnotami stanovenými u referenčních vzorků.

Klíčová slova

Křemelina, Rozsivky, Pucolán, amorfni SiO_2 , Cementové malty, Příměs, Portlandský cement

Abstract

The aims of this bachelor's thesis are the properties and the use of diatomaceous earth as a partial replacement of cement in concrete. It provides information about the origin of diatomaceous earth, sedimentation of dead diatoms and variety of algae, including chemical and physical properties of the diatoms according to origin. The paper also contains information about significant deposits of diatoms, the manner and intensity of mining, including treatment of raw diatomaceous earth for further use. The main use of diatomaceous earth is in the filtration, which represents more than half of total consumption. An important factor for use in building is a high content of amorphous SiO_2 and associated pozzolana activity of diatomaceous earth. The experimental part was carried out research on the influence of diatomaceous earth as pozzolanic admixtures on the properties of cement mortars. Tested specimens were obtained by adding 10% diatomaceous earth by weight of cement in the cement mortars. As admixtures were used three diatomaceous earth of different chemical composition, particle size and pozzolanic activity. The evaluated parameters were mortar density, flexural and compressive strength. The microstructure of mortars were also observed. Test results were compared with those determined by reference mortars.

Keywords

Diatomaceous earth, Diatoms, Pozzolan, amorphous SiO_2 , Cement mortars, Admixture, Portland cement

Bibliografická citace VŠKP

Štěpán Zimmermann *Křemelina - reaktivní příměs do cementových kompozitů*. Brno, 2015. 64 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14.5.2015

.....
podpis autora
Štěpán Zimmermann

Poděkování

Tato bakalářská práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS.

Děkuji paní prof. RNDr. Pavle Rovnaníkové, CSc. za její odborné vedení, ochotu a čas, který mi věnovala při konzultacích mé bakalářské práce.

Úvod	10
A. Teoretická část.....	11
A.1 Původce křemeliny – rozsivky.....	12
A.2 Rozdíly mezi křemelinou podle původu.....	14
A.3 Procesy probíhající po usazení.....	17
A.4 Chemické složení	18
A.5 Fyzikální vlastnosti	20
A.6 Světová produkce křemeliny.....	21
A.7 Těžba a zpracování křemeliny	21
A.8 Ekonomické faktory	23
A.9 Komerční využití křemeliny	24
A.10 Obecné aplikace křemeliny.....	25
A.10.1 Dynamit.....	25
A.10.2 Insekticid.....	26
A.10.3 Filtrace	27
A.10.4 Doplněk stravy	28
A.11 Použití ve stavebnictví	28
A.11.1 Použití přírodní a kalcinované křemeliny jako příměsi v cementu... ..	30
A.11.2 Použití křemeliny jako lehkého kameniva v mezerovitém betonu	33
B. Experimentální část.....	37
B.1 Použité suroviny.....	38
B.1.1 Cement – CEM I 42,5 R Radotín	38
B.1.2 Superplastifikační přísada – Mapefluid N200	38
B.1.3 Křemelina – ENORANDALL 3	39
B.1.4 Křemelina – Enorandall 7.....	41
B.1.5 Křemelina filtrační F4	43
B.1.6 Zkušební křemenný písek.....	45
B.2 Použité zkušební metody	45
B.2.1 Stanovení konzistence čerstvé malty dle ČSN EN 1015–3	45

B.2.2	Zhotovení zkušebních těles pro zkoušky pevností	46
B.2.3	Stanovení objemové hmotnosti zatvrdlé malty dle ČSN EN 196–1	47
B.2.4	Stanovení pevnosti zatvrdlé malty v tahu za ohybu dle ČSN EN 196–1	47
B.2.5	Stanovení pevnosti zatvrdlé malty v tlaku dle ČSN EN 196–1	48
B.3	Výsledky a diskuze	48
B.3.1	Konzistence dle ČSN EN 1015–3	48
B.3.2	Pevnost v tahu za ohybu	48
B.3.3	Pevnost v tlaku.....	50
B.3.4	Objemová hmotnost zatvrdlých malt.....	51
B.3.5	Snímky z REM	52
B.3.6	Nasákavost.....	54
	Závěr	55
	Seznam použitých zdrojů.....	58
	Seznam použitých chemických vzorců.....	61
	Seznam tabulek.....	63
	Seznam obrázků.....	64

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá vznikem, vlastnostmi a použitím křemeliny především jako reaktivní příměsi v cementových kompozitech. První část je zaměřena na hnědé řasy rozsivky jakožto původce vzniku křemeliny, včetně jejich druhové rozmanitosti a prostředí výskytu. Je popsán princip vzniku křemeliny usazováním, rozdělení nalezišť dle původu, rozdíly mezi nimi a výskyt křemeliny. Dále je práce zaměřena na možnosti a způsob těžby v rozdílných nalezištích, úpravu surové křemeliny a její chemické a fyzikální vlastnosti v závislosti na původu a znečištění jinými horninami. Následují faktory ovlivňující ekonomické využití jednotlivých nalezišť a možnosti použití vzhledem k charakteru křemeliny z těchto nalezišť. Největší uplatnění křemelina našla jako filtrační médium v potravinářském průmyslu, při úpravě a čištění vody, pro filtraci olejů a v chemickém průmyslu. Velký potenciál křemeliny je pro širší využití v dalších oblastech jako nanotechnologie a farmaceutický průmysl. Ve stavebnictví se využívá zejména její vysoký obsah amorfního SiO_2 , chemická odolnost, vysoká pórovitost a dobré tepelně izolační vlastnosti. Používá se jako pucolánová přísada do cementu, izolační materiál, lehké kamenivo s izolačními vlastnostmi v lehkých betonech a jinde.

Experimentální část práce se zabývá výzkumem vlivu křemeliny jako pucolánové příměsi na vlastnosti cementových malt. Testována je náhrada 10 % hmotnosti cementu v cementových maltách 3 filtračními křemelínami o rozdílném chemickém složení, granulometrii a pucolánové aktivitě. Hodnocené parametry zatvrdlých malt jsou objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Výsledky zkoušek jsou porovnány s hodnotami stanovenými u referenčních vzorků.

A. Teoretická část

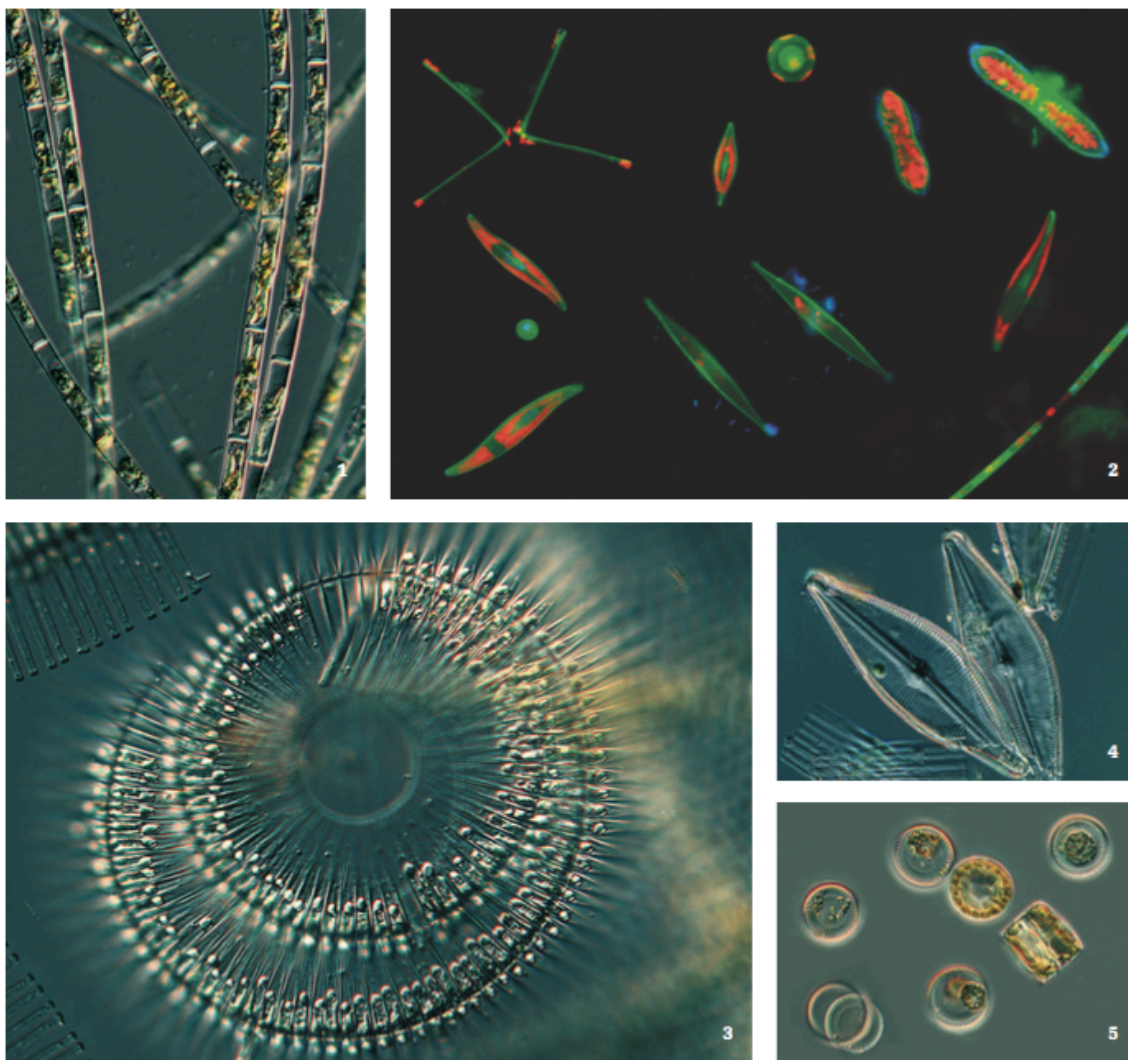
A.1 Původce křemeliny – rozsivky

Rozsivky jsou jednobuněčné hnědé řasy, které lze zařadit mezi nejrozšířenější organismy na Zemi. Nejčastěji se vyskytují ve vodních ekosystémech, ale můžeme je nalézt i v suchozemských ekosystémech. Hnědé řasy obsahují barvivo chlorofyl, díky kterému jsou schopny ze vzdušného oxidu uhličitého pomocí fotosyntézy vytvářet organické látky. Křemík, který potřebují na stavbu schránky a jsou na něm životně závislé, přijímají aktivně z prostředí. V případě, že je v prostředí křemíku nedostatek, řasy nemohou růst, rozmnožovat se a následně dochází k jejich úhynu. Křemičitá schránka rozsivek se nazývá frustula a je složena ze dvou misek, přičemž horní část je větší a přiléhá na spodní část. Existují dva morfologické typy schránek a to centrické (kruhové nebo radiální) nebo penátní (podlouhlé nebo axiální). Struktura schránek je obvykle velmi složitá, ornamentální a vzorem a symetrií druhově specifická. Těchto znaků se úspěšně využívá při klasifikaci jednotlivých druhů rozsivek. Některé druhy se mohou pomocí výběžků spojovat do mnohobuněčných kolonií. Pokud řasy produkují navíc sliz, mohou se s jeho pomocí přichytit k podkladu a vytvářet na něm povlak. Rozsivky se rozmnožují dělením, přičemž dceřiná buňka si ponechá jednu část schránky a druhou si musí vytvořit sama. Část schránky, kterou si buňka musí vytvořit, je vždy menší a tím dochází k postupnému zmenšování buněk. Jestliže dojde ke zmenšení velikosti buněk pod určitou mez, dojde k zániku nebo je nutné, aby buňka přešla na pohlavní způsob rozmnožování, při kterém postupně dojde k obnovení původní velikosti [1] [2].

Výskyt rozsivek je velmi rozsáhlý, převážně se vyskytují ve fytoplanktonu mořských vod bohatých na živiny, dále pak v potocích, řekách, jezerech, ale i na povrchu vlhkých skal. Druhově jsou rozsivky velmi rozmanité, jejich existence čítá asi 285 rodů, což odpovídá asi 10 – 12 tisíci druhů. Jejich podíl na produkci organické hmoty rostlinami, řasami a sinicemi se odhaduje na 20 – 25% z celkové produkce na Zemi a řadíme je také mezi výrazné producenty kyslíku [1] [2].

V Evropě je převážná většina rozsivek zastoupena ve fytoplanktonu stojatých vod. Jejich přítomnost se projevuje hnědým zbarvením stojatých vod nebo rezavě hnědými povlaky na bahně a kamenech v tekoucích vodách. Vyskytují se převážně na jaře a na podzim, některé druhy i v létě, ale často bývají z fytoplanktonu vytlačovány toxickými sinicemi [1] [2].

Některé druhy (převážně mořského původu) mají specifické nároky na životní prostředí na rozdíl od sladkovodních rozsivek, jejichž nároky na podmínky k životu nejsou tak specifické. Rozhodujícími faktory jsou např. chemické složení vody, teplota vody, pH vody, množství živin a salinita. Díky tomu je lze poměrně spolehlivě použít jako bioindikátory a na základě druhové rozmanitosti lze zjistit s jistou úspěšností kvalitu vody v dané lokalitě [1] [2].



Obr. 1 Různé druhy rozsivek [1]

A.2 Rozdíly mezi křemelinou podle původu

Křemelinu můžeme popsat jako horninu podobnou křídě, měkkou, drobivou, velmi jemně porézní a velmi lehkou (plovoucí na vodě až do nasycení). Křemelina je v podstatě chemicky inertní ve většině kapalin a plynů. Vzhledem k velkému objemu pórů a vysoké teplotě tavení má křemelina také nízkou tepelnou vodivost. Jestliže je křemelina čistá, má bílou barvu, ale obvykle bývá zbarvena v odstínech šedi a vzácně se vyskytuje černá [2] [11].

Rozsivky, a to jak mořské tak kontinentální, vyžadují tři podmínky k životu: vodní prostředí, světlo a trvalý přísun živin a minerálů. I když tyto podmínky nejsou nijak náročné, jejich splnění zajišťuje životaschopnost rozsivek a jejich rozmnožování, a závisí na nich rozložení a velikost nalezišť. Živiny jako fosfáty a dusičnany se po odumření rozsivek vracejí zpět do vody, rozkládají se na mořském dně nebo na dně jezera. Naproti tomu oxid křemičitý zabudovaný ve frustulách je nastálo odebrán z vody, pokud se při usazování nerozpustí. Kvůli tomu je nutný stálý přísun oxidu křemičitého do prostředí, aby mohla pokračovat produkce rozsivek [1] [2].

Přestože mořské prostředí zahrnuje hluboké oceány, kontinentální šelf a pobřežní oblasti, se oblast výskytu rozsivek, kvůli požadavkům na sluneční svit, omezuje na 100 – 200 m pod hladinou. Většina mořských druhů rozsivek jsou stenohalinní, což znamená, že vyžadují konstantní slanost vody v prostředí a dokáží tolerovat pouze malé odchylky slanosti. Takto příznivé podmínky můžeme nalézt v pobřežních oblastech, kde dochází k vyzdvižení chladnější vody, bohaté na živiny, z větších hloubek k hladině moře. Zde jsou pomocí větru promíchány s povrchovými vodami a dochází tak k recirkulaci živin. Příkladem těchto podmínek jsou západní pobřeží Severní Ameriky (oblast Kalifornie), Jižní Ameriky a Afriky, především oblasti pobřežních pánví a šelfů, které poskytují dostatečný přísun chladnějších vod bohatých na živiny a poskytují tak příznivé podmínky pro výskyt rozsivek [2].

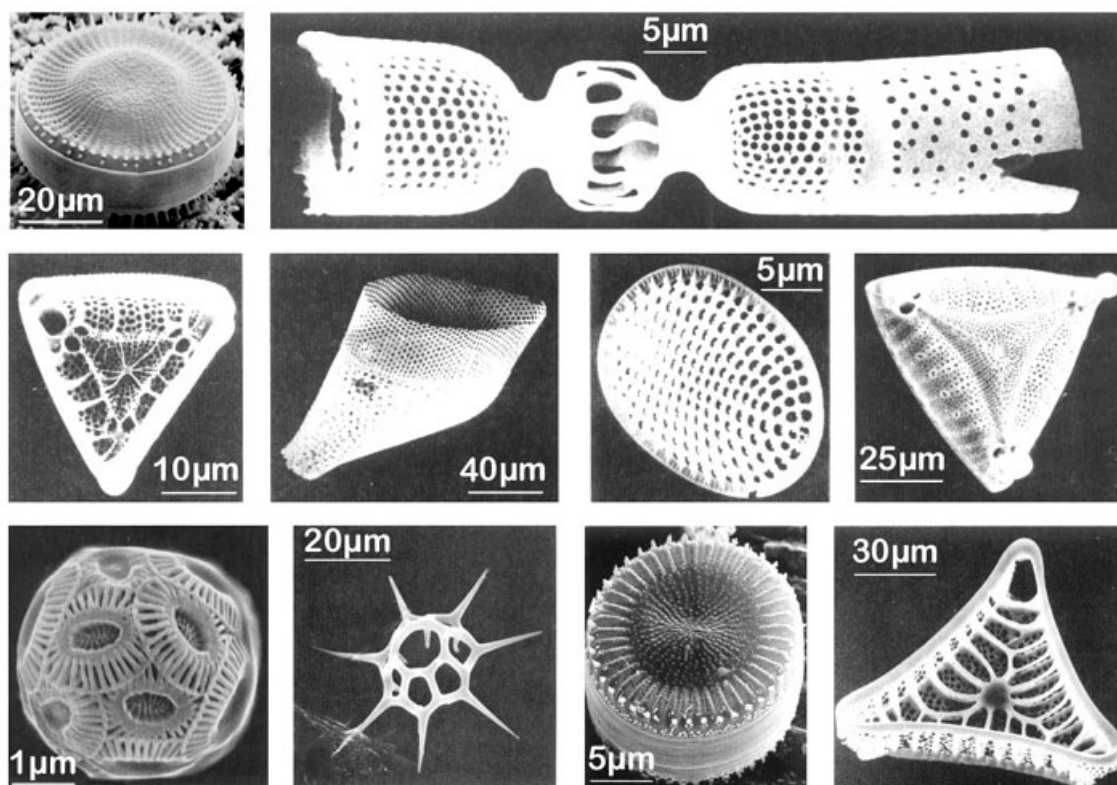
Kontinentální druhy rozsivek mají stejné požadavky na přísun živin a prostředí k životu, avšak osidlují širokou škálu sladkovodních prostředí,

převážně jezera, rybníky, řeky, potoky od období Eocénu. Naleziště komerčně využívané křemeliny, jsou především jezerního původu, kde mohou vznikat mohutné a plošně rozsáhlé sedimenty. Tvorba těchto sedimentů je často spojena s vulkanickými procesy (např. horké prameny), které zajišťují přísun oxidu křemičitého potřebného pro růst frustul. Ve sladkovodních systémech můžeme nalézt rozsivky planktonní nebo bentické (žijící na dně). Planktonní rozsivky se vyskytují ve stojatých vodách (jezera, rybníky, přehrady) a penátní bentické rozsivky se vyskytují převážně v říčních systémech. Teplota vody, salinita, pH a živiny značně kolísají oproti mořskému prostředí. Kvůli kolísajícím vlastnostem prostředí jsou kontinentální druhy rozsivek euryhalinní, to znamená, že dokáží tolerovat široký rozsah slanosti vody, vzhledem k stenohalinním mořským druhům rozsivek. Na druhou stranu sladkovodní rozsivky jsou náchylné na příliš alkalické prostředí [2] [15].

Důležitým faktorem při tvorbě křemeliny je znečištění cizorodými látkami při usazování. Častou, ale závažnou nevýhodou mořských prostředí v pobřežních oblastech může být rychlý a objemný přísun terigenního sedimentu z kontinentu, který se usazuje spolu s křemelinou a dochází tak ke snižování koncentrace křemeliny. Dalším příkladem může být biogenní znečištění odumřelými schránkami prvoků – radiolárií, které se běžně vyskytují spolu s rozsivkami v planktonu. Na těchto možných původcích znečištění je závislá komerční využitelnost a kvalita mořských nalezišť křemeliny. Stabilní, trvalé a příznivé životní podmínky s dostatečným přísunem živin mají velký vliv na velikost, kvalitu a komerční využití ložisek křemeliny. Ložiska křemeliny podél stabilního, trvalého břehu a v přílivových oblastech s dobrou kvalitou vody a dostatečným prosluněním jsou většinou mohutná a vysoce kvalitní. Použití křemeliny z těchto ložisek je široké, včetně použití k filtraci. Jako příklad můžeme uvést oblast Monterey rozkládající se na téměř 800 km dlouhém pásu na západním pobřeží Kalifornie. Tloušťka sedimentu křemeliny mořského původu zde dosahuje až 2000 m a skládá se z biogenního oxidu křemičitého, vápence, detritických sedimentů a sopečného popela. V této oblasti v blízkosti města Lompoc se nachází jedno z největších komerčně využívaných ložisek na světě, tloušťka těžené vrstvy křemeliny zde dosahuje asi 300 m [2] [15].

Tabulka 1: Srovnání rozsivek, jejich stanovišť a faktory, které ovlivňují tvorbu mořských a kontinentálních (jezerních) usazenin křemeliny [2]

Parametr	Mořské usazeniny	Kontinentální (jezerní) usazeniny
Rozsivky a jejich prostředí	Primárně planktonické formy; omezeně bentické a pelagické formy; bentické formy jsou vzácné v hlubokomořských sedimentech.	Planktonické a bentické formy v jezerních usazeninách, planktonické formy převažují. Bentické formy převážně v řekách, potocích a bažinách.
	Stenohalinní	Euryhalinní
	Stabilní teplota, salinita, pH, obsah živin a vodní proudění.	Měnicí se teplota, salinita, pH, obsah živin a vodní proudění.
	Primárně pobřežní oblasti s cirkulací vody bohaté na živiny v hloubkách do 200 m; také hluboko mořský plankton.	Primárně malé jezerní systémy vzniklé vulkanickou činností. Vyskytují se také v systémech rybníků, močálů a bahna.
Prostředí nalezišť	Vysoká produktivita rozsivek; dlouhodobý proces; minimální poškození frustul a biogenní rozpad, výška vodního sloupce umožňuje rozsivkám dosáhnout dna.	Vysoká produktivita rozsivek; dlouhodobý proces, ale kratší než u mořských nalezišť; minimální poškození frustul a biogenní rozpad; periodická sopečná činnost.
Znečištění	Znečištění terigenními (kontinentálními) sedimenty v blízkosti pobřeží nebo mořskými planktonními prvky (radioláriemi) během usazování.	Znečištění vnesením přebytku klastického sedimentu a sopečného popela do povodí.
Diagenese a trvanlivost	Omezený kryt z mořského sedimentu křemelinu zhutňuje a odstraňuje z něj vodu. Vyluhováním se odstraní přebytečná organická hmota a zvýší se tím její kvalita. Příliš vysoký tlak může rozdrtit frustuly a větší hloubka sedimentace než 600 m při teplotě větší než 50 °C může vést k rekrystalizaci oxidu křemičitého.	Omezený klastický sediment nebo sopečný kryt zhutňuje křemelinu a odstraňuje z ní vodu. Vyluhováním se odstraní přebytečná organická hmota a zvýší se tím její kvalita. Příliš vysoký tlak může rozdrtit frustuly a větší hloubka sedimentace než 600 m při teplotě větší než 50 °C může vést k rekrystalizaci oxidu křemičitého.
	Vysoká trvanlivost především díky oxidu křemičitému ve frustulách. Kryt z mořského sedimentu chrání křemelinu před povznesením a před erozí mořskými proudy.	Vysoká trvanlivost především díky oxidu křemičitému ve frustulách. Kryt z terigenního sedimentu nebo z lávových proudů chrání křemelinu před zvětráváním a erozí.
Geologické období	Křída až Holocén	Eocén až Holocén
Optimální období vzniku	Mladší třetihory – Miocén	Mladší třetihory – Miocén (speciálně střední Miocén)

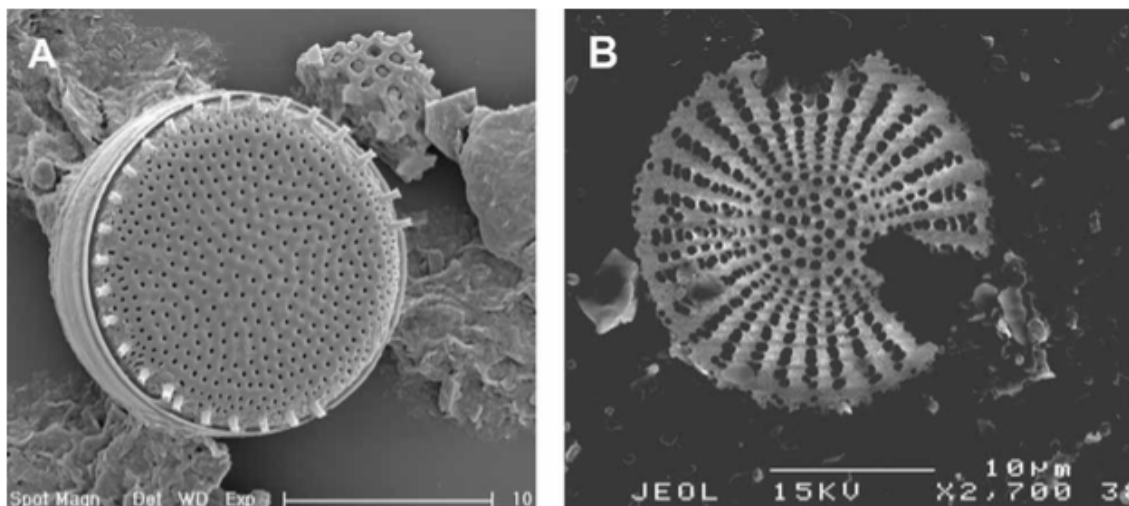


Obr. 2 Rozmanitost tvarů a velikostí frustul [24]

A.3 Procesy probíhající po usazení

Již usazené frustuly jsou odolnější proti rozložení než ostatní biologické materiály, nicméně i po usazení jsou vystaveny procesům, které mohou změnit mineralogické složení, strukturu i texturu sedimentu. Tyto procesy, jejichž účinky mohou být významné, souhrnně nazýváme diagenéze. Diagenéze může zachovat sediment v nezměněné podobě, může zlepšit jeho kvalitu nebo jej úplně zničit. Vždy závisí na typu a účinku působících procesů. Sedimentární kryt pomáhá zachovat křemelinu a chrání ji před erozí, kromě toho může křemelinu stlačit a odstranit z ní přebytečnou vodu. Vyluhováním dochází k odstranění organické hmoty a dalších biogenních materiálů, což vede ke zlepšení kvality naleziště křemeliny. Negativní vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti křemeliny může mít větší hloubka uložení se zvyšující se teplotou, jejichž následkem dochází k rekrystalizaci frustul. K tomuto procesu dochází v hloubce 600 až 1500 m, kdy při teplotě 50°C dochází k přeměně amorfního SiO₂ na opál a dále při teplotě 80°C na křemen. Následkem dokončení

diagenetického procesu lithifikace (přeměnění nesoudržného sedimentu v pevnou horninu) závislého na větší hloubce uložení a zvýšené teplotě dojde k přeměně křemeliny na horniny porcelanit a rohovec. Tyto horniny mají oproti křemelině výrazně nižší pórovitost a větší hustotu [2] [15].



Obr. 3 A – nepoškozená frustula; B – porušená struktura frustuly rozpuštěním [4]

Vyzdvižené sedimenty jak jezerního tak mořského původu, jsou vystaveny povětrnostním vlivům a erozním procesům. Mořská naleziště jsou chráněna mladšími mořskými sedimenty, které překryly vrstvu křemeliny. Naleziště jezerního původu jsou chráněna sedimenty spojenými s vulkanickou činností nebo překrytím lávovými proudy [2] [15].

A.4 Chemické složení

Chemické složení křemeliny je především ovlivněno frustulami odumřelých rozsivek, které byly vytvořeny biologickou sekrecí amorfního SiO_2 . Frustuly žijících rozsivek, nebo odumřelých v průběhu Holocénu, strukturou připomínají rozpustný amorfní silikagel oproti fosilním schránkám, které se podobají opálové struktuře a jsou méně rozpustné. Chemická analýza křemeliny ukázala, že obsah amorfního SiO_2 se obvykle pohybuje od 70 do 90 hmot. % a v některých mořských nalezištích může dosahovat až 97 %. Druhou hlavní složkou obsaženou v křemelině z různých světových nalezišť je

Al_2O_3 v množství od 2 do 10 % hmot. Dále obsahuje malé množství oxidů Fe, Ti, P, Ca, Mg, Na a K [2] [15].

Obsah celkové H_2O v pórové opálové struktuře frustul se pohybuje od 1,9 hmot. % u některých mořských druhů rozsivek a do 9,6 hmot. % u některých jezerních druhů rozsivek. Křemelina obecně obsahuje velké množství volné vody od 10 do 60 % hmot. H_2O [2] [15].

Obsah CO_2 a organických zbytků se pohybuje od 1 do 17 hmot. %. Křemelina může obsahovat mnoho druhů nečistot. Mezi znečištění mořského původu můžeme zařadit: Rohovec, manganové konkrce, fosfáty, radiolárie, lasturnatky, fragmenty hub, schránky mlžů a sopečné horniny. Mořské usazeniny rovněž mohou obsahovat malé množství silanolu ($-\text{Si}-\text{OH}$) a siloxanu ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$) vázané na povrchu frustul. Mezi znečištění křemeliny jezerního a říčního původu řadíme: terigenní sedimenty, sopečný popel, křemen, slída, živce a také biogenní materiály jako fosilní listy, kosti ryb a plazů, rašelina a slín. Běžnými nečistotami v obou typech nalezišť jsou jíly, sádrovec, kalcit a méně časté sůl, pyrit a síra. Chemické vlastnosti mořských a kontinentálních křemelin, jsou shrnuty v tabulce 2 [2] [15].

Tabulka 2: Srovnání chemického složení mořských a kontinentálních (jezerních) usazenin křemeliny [2]

Parametr	Mořské usazeniny	Kontinentální (jezerní) usazeniny
obsah SiO_2 v křemelině [%]	70 – 97	70 – 90
obsah H_2O ve frustulách [%]	Relativně nízký, minimální hodnota 1,9 u specifických druhů.	Relativně vysoký, maximálně 9,6 u některých jezerních druhů.
obsah H_2O v křemelině [%]	10 – 60	
Znečištění	Rohovec, manganové konkrce, fosfáty, radiolárie, lasturnatky, škeble, jíl, sádrovec, kalcit, sůl, pyrit, síra a rybí kosti.	Křemen, slída, živec, slín, rašelina, zbytky rostlin, kosti plazů a ryb, jíl, sádrovec, vápenec, sůl, pyrit a síra.
	hlína, sádrovec, kalcit, sůl, pyrit, síra a fosilní rybí kosti	

A.5 Fyzikální vlastnosti

Mořská naleziště křemeliny jsou obecně plošně rozsáhlejší a jejich mocnost je také větší. Další výrazné rozdíly ve fyzikálních vlastnostech mezi křemelinou z mořských a jezerních nalezišť nebyly stanoveny. Schránky rozsivek jsou velmi malé, jejich průměr se pohybuje od 0,75 do 1000 μm , ovšem většina z nich má průměr od 10 do 150 μm . Měrná hmotnost opálové struktury ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) rozsivkových schránek se pohybuje od 1,9 do 2,35 g/cm^3 , nicméně křemelina díky složitému tvaru frustul s pórovitou strukturou se vyznačuje nízkou sypnou hmotností a vysokou pórovitostí. Sypná hmotnost natěžené křemeliny se pohybuje v rozmezí 0,320 až 0,640 g/cm^3 a pórovitost schránek 10 až 30 obj. %. Díky vysoké pórovitosti se vyznačuje také vysokou nasákavostí. Sypná hmotnost vysušené křemeliny se pohybuje od 0,080 do 0,256 g/cm^3 a vlhké křemeliny od 0,160 do 0,480 g/cm^3 . Nízká tepelná vodivost křemeliny je dána především její vysokou pórovitostí a teplotou tání 1400 až 1750°C. Tvrdost zpevněné křemeliny dle Mohse je pouze asi 1,5 a je ovlivněna především křehkostí a snadnou lámavostí, zatímco tvrdost jednotlivých frustul dle Mohse je 4,5 až 6,0 [2]

Tabulka 3: Srovnání fyzikálních vlastností mořských a kontinentálních (jezerních) usazenin křemeliny [2]

Parametr	Mořské usazeniny	Kontinentální (jezerní) usazeniny
Rozsah nalezišť	Rozsáhlejší	Menší
Tloušťka sedimentu	Tlustší	Tenčí
Fyzikální vlastnosti frustul	Velikost: 0,75 – 1000 μm , nejčastěji 10 – 150 μm	
	Pórovitost: 10 – 30 obj. %	
	Měrná hmotnost: 1,9 – 2,35 g/cm^3	
	Tvrdost dle Mohse: 4,5 – 6,0	
Sypná hmotnost (po natěžení) (g/cm^3)	0,320 – 0,640	
Sypná hmotnost (suchá křemelina) (g/cm^3)	0,080 – 0,256	
Sypná hmotnost (mokrý křemelina) (g/cm^3)	0,160 – 0,480	
Tvrdost dle Mohse	přibližně 1,5 (v závislosti na drobivosti)	
Tepelně izolační vlastnosti	Nízká tepelná vodivost, teplota tavení 1400 – 1750°C	

A.6 Světová produkce křemeliny

Největším světovým producentem křemeliny jsou Spojené státy, které vyprodukují asi 35 % z celkové světové produkce křemeliny. Následovány jsou Čínou s 20 %, Dánskem s 16 % (produkce suroviny Moler, která obsahuje 30 hmot. % jílu) a Japonskem s 5 %. Křemelina se dále těží v menším množství v dalších státech. Největším světovým vývozcem křemeliny jsou Spojené státy, kterým připadá více než 50 % celkového světového exportu. V České republice se křemelina těží v Borovanech u Českých Budějovic [2] [7] [8].

Tabulka 4: Světová produkce křemeliny v tisících tun [7] [8]

Stát	2009	2010	2011	2012
Argentina	62	54	61	55
Austrálie	20	20	20	20
Chile	23	31	23	25
Čína	440	400	440	420
Česká Republika	31	32	46	45
Dánsko	303	338	338	338
Francie	75	75	75	75
Itálie	25	25	25	25
Japonsko	110	110	100	100
Mexiko	81	92	84	85
Peru	10	11	15	81
Rusko	28	30	32	33
Španělsko	50	50	50	50
Turecko	28	18	45	30
USA	575	595	813	735
Celkem	2210	1850	2190	2120

A.7 Těžba a zpracování křemeliny

Většina nalezišť ve Spojených státech jsou povrchového typu a těžba probíhá v povrchových otevřených lomech. Povrchová těžba je vzhledem k ostatním druhům těžby poměrně nízkonákladová. Na skrývku ornice i k těžbě křemeliny se používají dozery s rozrývačem, skrejpry, čelní nakladače, rypadla a nákladní automobily. Nicméně například v Chile, Číně nebo Francii je poměrně častá i hlubinná těžba v dolech, záleží na typu, hloubce a geologických podmínkách. Běžně se využívá dobývací metoda komora – pilíř,

kdy se využívají stroje podobné těm jako u povrchové těžby. V případě malých dolů se používají i ruční nástroje. Vzhledem ke křehkosti a drobivosti křemeliny není nutné, jak při povrchové tak při hlubinné těžbě, používat výbušniny. Na Islandu se křemelina těží ze dna jezera Myvatn pomocí sacích bagrů. Po natěžení se většinou křemelina skladuje na otevřených skládkách, aby se oddělila část organických nečistot a snížil se obsah vody, před přijetím do zpracovatelského procesu [2] [3] [12].

Zpracování natěžené křemeliny se obvykle provádí v blízkosti dolu, kvůli snížení nákladů na převoz křemeliny, která může po natěžení obsahovat až 60 % vody. Zpracovací proces zahrnuje drcení, sušení, kalcinaci, dopravu a třídění pomocí teplého vzduchu. K primárnímu drcení se používají kladivové drtiče a válcové drtiče pro drcení na frakci 12,5 mm, jelikož při tomto typu drcení nedochází k poškození frustlu. Pomocí horkého vzduchu je podrcená křemelina vedena přes speciální drtící ventilátory a cyklony, kde dochází postupně ke zmenšení velikosti, sušení a třídění. Pomocí cyklonů nedochází pouze ke třídění dle velikosti, ale také k odstranění nečistot na základě rozdílné hmotnosti. Redukce velikosti je důležitý krok, kde dochází k rozdužení jednotlivých frustul, aniž by došlo k jejich poškození. Zachování této struktury je velice důležité pro použití křemeliny k filtraci, jelikož tato struktura je jedním z nejdůležitějších faktorů při filtraci. Dalším krokem zpracování je kalcinace, která se běžně provádí v rotačních pecích. Při zpracování křemeliny je nutné přijmout zvláštní opatření ke snížení zdravotního rizika způsobeného možným vdechnutím mikroskopických částic SiO_2 [2] [3].

Výrobní náklady pro povrchovou těžbu můžeme rozdělit přibližně 10 % těžba, 60 % zpracování (cca 30 % energie), 30% balení a expedice. Významný vliv na spotřebu energie a tím i náklady na výrobu má kalcinace. Výsledný produkt se nabízí v několika různých stupních dle použití. Sledovanými faktory, které ovlivňují rychlost filtrace a absorpční kapacitu, jsou: velikost, tvar, uspořádání a poměr různých typů frustul. Další sledované parametry jsou: obsah SiO_2 a nečistot, jako některé minerální látky, železo (hlavní nečistota), jíly, písek a organické zbytky. Pro některé aplikace je také sledována bělost a brusná tvrdost. Velký vliv na vlastnosti křemeliny má rozsah zpracování, podle

kterého ji můžeme rozdělit do třech širokých skupin: podrcená a vysušená bez kalcinace, kalcinovaná při teplotě 1000 °C a kalcinovaná při teplotě 1200 °C s přidáním až 10 % uhličitanu sodného, soli nebo hydroxidu sodného. Kalcinací se odstraňují zbytky organické hmoty a zvyšuje se rychlost filtrace. Dochází ke snížení měrného povrchu natavením jemnější struktury, spékání v malé shluky a zvětšení velikost částic, zvětšení velikosti pórů, k oxidaci železa, která se projevuje změnou původní žlutohnědé nebo šedé barvy na růžovou nebo bílou, zvýšení měrné hmotnosti a zvýšení tvrdosti dle Mohse. Nežádoucím jevem při kalcinaci je produkce volného krystalického SiO_2 [2] [3].

Proces kalcinace s přidavkem tavidla produkuje filtrační křemelinu, která umožňuje rychlejší průtok filtrátu. Jako tavidlo se do rotační pece přidává např. uhličitan sodný, který zvyšuje natavení povrchové struktury frustul. Současně dochází ke spékání schránek do větších shluků. Kalcinace s přidavkem tavidla modifikuje fyzikální strukturu frustul, převádí oxidy železa do čiré skelné fáze a produkuje tak filtrační křemelinu bílé barvy [2] [3].

A.8 Ekonomické faktory

Přestože křemelina je poměrně častá sedimentární hornina, velká a ekonomicky využitelná ložiska, která by poskytovala kvalitní křemelinu, nejsou běžná a jejich počet je nízký. Parametry určující využitelnost ložisek křemeliny, ať mořského nebo jezerního původu, jsou: plošný rozsah, mocnost vrstev, homogenní vrstvy (narušení jinými horninami), hloubka ložiska (druh těžby), tvar a velikost frustul (druh rozsivek), nutnost selektivní těžby (proměnná kvalita nebo složení). Ložiska mořského a jezerního původu jsou velmi podobná kvalitou, způsobem těžby, zpracováním a následným použitím křemeliny, ale jsou mezi nimi i rozdíly. Hlavní rozdíly jsou v počtu ložisek a jejich velikost. Zatímco většina využívaných ložisek jsou jezerního původu, ložiska mořského původu jsou obecně větší a považují se za kvalitnější, vzhledem k rozmanitosti tvarů a velikostí frustul. Další významné rozdíly v těžbě nebo zpracování nebyly zaznamenány. Porovnání ložisek mořského i kontinentálního původu je uvedeno v tabulce 5 [2] [3].

Tabulka 5: Srovnání mořských a kontinentálních (jezerních) nalezišť křemeliny [2]

Parametr	Mořská naleziště	Kontinentální (jezerní) naleziště
Množství nalezišť	Méně	Více
Velikost nalezišť	Velké	Malé
Produkce křemeliny	Vysoká	Nízká až střední
Způsob těžby	Povrchová těžba (důlní těžba)	
Zpracování	Šetrné drcení a mletí, aby se zachovala struktura frustul. Třídění pomocí horkého vzduchu v cyklonech. Kalcinace, nebo kalcinace s přídavkem tavidla.	
Vlastnosti po zpracování	Snížení obsahu H_2O , CO_2 , organických zbytků. Kalcinací se mění barva na růžovou kvůli oxidaci železa. Kalcinací s přídavkem tavidla se mění barva na bílou.	
Použití	Primárně k filtraci, použitelná i jako plnivo, přísada, absorbent a brusivo.	Primárně jako plnivo, přísada, absorbent, brusivo, použitelná i k filtraci

A.9 Komerční využití křemeliny

Výsledný produkt po zpracování křemeliny se vyznačuje vysokou jemností částic, vysokou pórovitostí s velkým měrným povrchem a vysokou absorpční schopností. Jedná se o chemicky inertní materiál, mírně abrazivní, s nízkým indexem lomu, s nízkou tepelnou vodivostí, s poměrně vysokou teplotou tavení, s pucolánovými vlastnostmi a vysokým obsahem SiO_2 . Používá se jak sušená přírodní křemelina, tak i kalcinovaná křemelina. Obě tyto formy mohou být dle potřeby míchány v různém poměru, aby se dosáhlo požadovaných vlastností. Velmi jemné podíly získané zejména z rukávových filtrů, které se používají pro čištění vzduchu z cyklónů, nacházejí využití především jako plnivo, hrubší podíly využití především v oblasti filtrace [2] [3].

Hlavní oblastí, kde se využívá křemelina, jsou nejrůznější stupně filtrace. Jako filtrační médium se používá při výrobě alkoholických nápojů (zejména pivo a víno), cukru, olejů a tuků, léčiv, vody (pitná voda, v průmyslu, odpadní vody a čištění vody z bazénů), ropy a v chemickém průmyslu. Velkým a rozvíjejícím se odvětvím je použití křemeliny jako absorbentu pro průmyslové znečištění a havárie (ropa, toxické kapaliny) nebo jako stelivo pro domácí zvířata. Dalším

důležitým odvětvím je použití křemeliny jako plnivo, kde obvykle slouží ke dvojímu účelu. Např. jako plnivo a matovací činidlo (snižuje lesk výsledného povrchového filmu) v nátěrových hmotách, víceúčelová složka v plastech a plnivo/absorbent v suchých práškových pesticidech, léčivech a jiných chemických látkách. Dalším významným odvětvím, kde se využívá křemelina, je stavebnictví. Jako izolační materiál se využívá křemelina sypká (volně ložená) nebo lisovaná do tvarovek, případně jako plnivo do izolačních výrobků s cementovým pojivem. Jako přísada se přidává do cementových malt, kompozitů a betonů při použití portlandského cementu jako pojiva, kde se také využívá pucolánových vlastností křemeliny. Rozvíjející oblasti použití křemeliny jsou biotechnologický a farmaceutický průmysl a zemědělství, kde lze křemelinu využít jako netoxický insekticid. Dalšími produkty vyráběnými z křemeliny jsou řezané tvarovky, které se již dlouhou dobu zejména v Číně používají jako stavební materiál a v Dánsku těžená surovina Moler, která obsahuje vysoký podíl jílu a používá se především jako tepelná izolace [2] [3] [5] [6] [7] [8].

Tabulka 6: Poměr využití křemeliny v USA [%] [5] [6]

Využití	2011	2012	2013	2014
Absorbent	12	13	13	14
Přísada do cementu	13	13	15	14
Plnivo	12	14	14	13
Filtrace	61	56	56	58
Ostatní	1	4	2	1

A.10 Obecné aplikace křemeliny

Křemelina se používá především k filtraci, ale možnosti jejího použití jsou daleko širší.

A.10.1 Dynamit

V 60. letech 19. století byl jedinou spolehlivou výbušninou používanou v dolech černý prach (forma střelného prachu). V roce 1846 připravená kapalná sloučenina nitroglycerin ($C_3H_5N_3O_9$) z glycerinu, kyseliny dusičné a sírové, měla mnohem větší účinnost, ale byla až příliš nestabilní a citlivá na rázy na to, aby mohla být využita pro trhací práce. Alfred Nobel začal s výzkumem v roce 1862.

Cílem bylo vynalézt stabilní výbušninu na bázi nitroglycerinu, která by nahradila do té doby používaný méně účinný černý prach. Snaha smíchat nitroglycerin s nějakým absorbentem se, po vyzkoušení mnoha materiálů, vyplatila až v roce 1867, kdy Nobel zjistil, že křemelina, díky své vysoké pórovitosti, velmi dobře absorbuje nitroglycerin a vytváří tak dobře tvarovatelnou směs. Výsledkem byl vynález mnohem stabilnější, bezpečnější a dobře tvarovatelné výbušniny nazvané dynamit (dle řeckého slova dynamis, které v překladu znamená síla). V roce 1867 si nechal dynamit patentovat ve Velké Británii a v roce 1968 ve Spojených státech. Dynamit se proslavil po celém světě a používal se při výstavbě tunelů, železnic silnic, při demolicích, atd. Nejčastěji se vyráběl ve formě válečků o délce asi 20 cm a průměru asi 3 cm. Po určitém čase se na jeho povrchu mohly objevit kapičky nitroglycerinu, což představovalo velké nebezpečí při manipulaci, jelikož jeho citlivost byla stejná jako u samotného nitroglycerinu. Tomuto jevu se dalo zabránit použitím nepropustných obalů. Další nevýhodou bylo, že dynamit mrzne při 8°C a nebylo ho tak možné použít v chladném počasí. V současné době se křemelina v dynamitu nahrazuje dusičnanem sodným, uhelným prachem a někdy se používá síra a dřevěné piliny [13] [14].

A.10.2 Insekticid

Jako insekticid lze teoreticky využít jakoukoliv křemelinu, která vykazuje vysoké absorpční schopnosti. Účinnost křemeliny jako insekticidu závisí na absorpční schopnosti, granulometrii, jednotnosti a tvaru frustul, pH a čistotě. Křemelina pro použití jako insekticid by měla mít vysoký obsah amorfního SiO_2 , částice o stejném průměru (ideálně $< 10 \mu\text{m}$), $\text{pH} < 8,5$, nízký obsah jílových částic a méně než 1 % krystalického křemene [16].

Z přírodních sypkých insekticidů je křemelina pravděpodobně jedna z neúčinnějších. Jakmile se dostane hmyz do kontaktu s křemelinou, dochází k jejímu zachycení na těle hmyzu. Neúčinnější je proti druhům hmyzu se štětinami nebo s drsným povrchem těla. Zachycená křemelina poškozují ochrannou vrstvu z vosku na kutikule, většinou sorpcí a v menší míře

mechanickým poškozením, případně obojím způsobem. Výsledkem takového poškození je ztráta vody z těla hmyzu, která vede k dehydrataci a následně k úhynu. Účinnost křemeliny z různých nalezišť na hmyz je odlišná. Křemelina mořského původu je pravděpodobně méně účinná, nicméně daleko větší vliv na účinnost mají morfologické vlastnosti rozsivek, z jejichž frustul je křemelina složena [16].

Nejčastěji se křemelina na hubení hmyzu používá v domácnostech, v zahradách a při ochraně skladovaných zemědělských produktů. Lze ji aplikovat i v zemědělství při pěstování ovoce, vinné révy a zeleniny. Účinná je i pro hubení blech u domácích mazlíčků (psů a koček) [16].

Dalším způsobem využití křemeliny jako insekticidu je v kombinaci s chemickým insekticidem, kdy se křemelina používá jako nosič. Jedním z příkladů může být i nechvalně proslulý Cyklon B, původně vyvinutý jako insekticid, se později výrazně zapsal do dějin 2. světové války. Cyklon B je vlastně granulovaná křemelina nasycená kyanovodíkem (HCN) s páchnoucí příměsí označující otravnou látku. Uchovává se v uzavřených nádobách a při kontaktu se vzduchem a vlhkostí se začne uvolňovat silně toxický plyný kyanovodík. Původně se používal v 1. světové válce na odvšívování uniform a oblečení vojáků. Později byl po zbavení páchnoucí příměsi používán Cyklon B v plynových komorách koncentračních táborů. Dle odhadů má tento insekticid na svědomí smrt asi 6 milionů Židů a další miliony lidí jiných ras a národností. Jeho výroba stále pokračuje, ale jeho název se změnil na Uragan D2, který se používá k dezinsekci a deratizaci [16] [17].

A.10.3 Filtrace

Surovou křemelinu je nutné před použitím k filtraci patřičně upravit. Nejdůležitější je proces kalcinace, kdy se z křemeliny odstraní organické zbytky a jiné nečistoty. Kalcinací se také změní struktura frustul. Rozlišují se 2 druhy kalcinace. Kalcinace pouze surové křemeliny a kalcinace křemeliny s přídavkem Na_2CO_3 nebo sodných solí, které snižují teplotu tavení. Kalcinovaná křemelina se třídí na jednotlivé frakce a odstraňuje se z ní prach,

který není vhodný pro filtraci. Pro jednotlivé stupně filtrace je vhodné použít křemelinou s rozdílnou granulometrií [18] [19].

Velmi důležitou vlastností křemeliny využívanou při filtraci je její pórovitost a velikost pórů. Póry v křemelině jsou ideální velikosti, aby se v nich zachytily pevné částice, které chceme ze suspenze odstranit, ale zároveň propustí rozpuštěné látky ve formě molekul a iontů. Účinnost filtrace je také velmi závislá na použitém filtračním zařízení [18] [19].

V potravinářském průmyslu se nejčastěji používají filtry svíčkové, které v kombinaci s vhodnou filtrační křemelinou zajišťují velmi dobré výsledky při filtraci. Potřebná dávka křemeliny při filtraci je většinou 1 – 2 g na litr filtrované tekutiny. Nejčastěji se používá při filtraci cukrového sirupu, piva, whisky, vína, ovocných šťáv, vody, minerálních nebo rostlinných olejů a léčiv [18] [19].

Jednou z nevýhod je jednorázové použití křemeliny k filtraci, která se musí po filtraci měnit a vzniká tak poměrně velké množství křemelinového odpadu. Čištění křemeliny po filtraci je možné, ale je příliš nákladné a ekonomicky nevýhodné. U některých aplikací lze odpad z filtrace úspěšně využít. Například křemelinu použitou pro filtraci vína lze úspěšně využít v zemědělství do kompostů jako hnojivo nebo pro nakypření půd [18] [19].

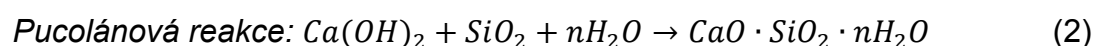
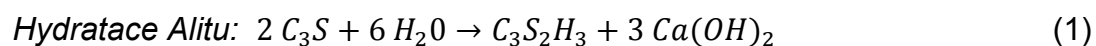
A.10.4 Doplněk stravy

Upravená a čištěná křemelina se používá jako doplněk stravy k pročištění organismu. Odstraňuje z organismu těžké kovy, jiné nežádoucí látky a čistí stěnu střev od nahromaděného hlenu. Uváděny jsou i jiné účinky, které ovšem nejsou zaručené, jelikož se jedná o doplněk stravy a ne léčivo. Křemelinu lze využít i jako doplněk stravy pro domácí zvířata [20].

A.11 Použití ve stavebnictví

Křemelina je sedimentární hornina složená z frustul odumřelých hnědých řas – rozsivek. Frustuly jsou tvořeny amorfním oxidem křemičitým ve formě hydrátu ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), ale kromě těchto frustul může křemelina obsahovat také

nečistoty, jako jsou kalcit, jílové minerály, křemen a živce. Vlastnosti křemeliny jsou dány především strukturou křemitých schránek, které jsou vysoce porézní, lehké, chemicky stabilní a inertní. Křemelina se ve stavebnictví využívá především jako pucolánově reaktivní příměs v portlandském cementu, v cementových maltách, omítkách a kompozitech. Pucolánová reakce křemeliny s cementem vede ke tvorbě dalších podílů C–S–H gelů. K uskutečnění pucolánové reakce je potřebný hydroxid vápenatý (Ca(OH)_2), který vzniká při hydrataci alitu (C_3S) a belitu (C_2S) a následně reaguje s amorfním oxidem křemičitým (SiO_2). Z tohoto důvodu dochází k pomalejšímu nárůstu počátečních pevností a pozdějšímu dosažení konečných pevností [21] [27].



Kromě ekonomických a ekologických výhod má použití křemeliny jako příměsi vliv i na vlastnosti čerstvého a zatvrdlého betonu. Na vlastnosti čerstvého betonu má vliv hlavně vysoká nasákavost křemeliny, kvůli které je nutné zvýšit vodní součinitel pro dosažení požadované konzistence, což má za následek snížení pevnostních charakteristik. Z tohoto důvodu je nutné použít superplastifikační přísadu pro snížení vodního součinitele a zachování požadované konzistence. V zatvrdlém betonu přídavek křemeliny zvyšuje odolnost proti ASR (alkalicko–křemičitá reakce) a odolnost proti působení chemicky agresivních látek. Smíchání křemeliny s cementem vede ke zvýšení měrného povrchu a má velký vliv na zrnitost cementu, kdy s přídavkem křemeliny se zvyšuje jeho jemnost, vysoký měrný povrch i jemnost křemeliny jsou dány především velikostí, tvarem a pórovitostí frustul, ze kterých vznikla. Kombinace těchto vlastností s vysokým obsahem amorfního oxidu křemičitého má za následek zlepšení mechanických vlastností zatvrdlého betonu [21] [27].

Další výhodou použití křemeliny je její nízká sypná hmotnost, které lze využít ke snížení vlastní hmotnosti konstrukce. Díky nízké tepelné vodivosti lze křemelinu použít při výrobě cihel a jiných výrobků pro tepelné a akustické izolace. Zpevněnou křemelinu lze využít i jako kamenivo do lehkého betonu,

kteře zlepřuje tepelně izolační vlastnosti zatvrdlého betonu a sniřuje vlastní hmotnost konstrukce. Díky její dobré odolnosti proti tepelnému a chemickému působení ji lze použít také pro zlepšení požární odolnosti betonu [21] [27] [23].

A.11.1 Použití přírodní a kalcinované křemeliny jako příměsi v cementu

Yilmaz a kol. se zabývali použitím přírodní a kalcinované křemeliny jako příměsi v portlandském cementu. Výzkum byl zaměřen na rozdílné fyzikální a chemické vlastnosti přírodní a kalcinované křemeliny, a jejich vliv na vlastnosti čerstvých a zatvrdlých cementových malt [21].

Jako suroviny pro přípravu cementových malt byly v tomto výzkumu použity slínek portlandského cementu, sádrovec (regulátor tuhnutí), křemelina (pucolán), normalizovaný písek a voda. Křemelina použitá v tomto výzkumu pocházela z regionu Kütahya/Alayunt (Turecko). Suroviny byly podrobeny chemické analýze, jejíř výsledky jsou v tabulce 7. Mineralogické složení cementu je uvedeno v tabulce 8 [21].

Tabulka 7: Chemické složení jednotlivých surovin [%] [21]

Oxidy	Slínek	Sádrovec	N. písek	Přírodní křemelina	Kalcinovaná křemelina
SiO ₂	20,50	0,38	94,05	78,24	93,60
Al ₂ O ₃	5,25	0,02	2,98	0,55	0,95
Fe ₂ O ₃	3,85	0,07	0,15	1,12	1,29
CaO	63,48	32,14	0,17	1,06	1,25
MgO	1,37	0,12	0,03	0,87	0,81
Na ₂ O	0,89	0,04	0,85	0,89	0,55
K ₂ O	0,40	0,02	1,20	0,75	0,46
SO ₃	1,21	46,12	0,05	0,98	0,21
Volné CaO	0,93	—	—	—	—
ZŽ	0,42	21,02	0,57	15,54	0,51
Reaktivní SiO ₂	—	—	—	62,33	71,21

Tabulka 8: Mineralogické složení slínku, výpočet dle Bogue [%] [21]

Slínkový minerál	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Obsah ve slínku [%]	58,4	14,9	7,4	11,72

Křemelina byla kalcinována v peci na 1000 °C po dobu 1 hodiny, rychlost nárůstu i poklesu teploty byla 20 °C/min [21].

Byly provedeny zkoušky stanovení měrné hmotnosti, měrného povrchu a síťový rozbor na sítích 45, 90, 200 µm. Přírodní i kalcinovaná křemelina byla ještě podrobena mineralogickému rozboru pomocí RTG difraktometrie a mikrostrukturální analýza byla provedena pomocí REM [21].

Pro výzkum byla připravena jedna referenční směs, tři směsi s náhradou cementu přírodní křemelinou a tři směsi s náhradou cementu kalcinovanou křemelinou. Referenční směs byla připravena z portlandského slínku, do kterého bylo přidáno 3,5 hmot. % sádrovce. Směsi obsahující křemelinu byly připraveny nahrazením (5, 10 a 20 hmot. %) portlandského slínku přírodní křemelinou, přičemž přídavek sádrovce byl zachován. Pojivové směsi byly pomlety v kulovém mlýně [21].

Všechny zkušební malty byly připraveny v poměru složek 450 g pojivo (cement), 1350 g normalizovaný písek a 225 ml vody. Pro zkoušky pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku byly vyrobeny zkušební tělesa o rozměrech 40×40×160 mm [21].

Chemická analýza přírodní a kalcinované křemeliny prokázala zvýšení množství oxidů s pucolánovými vlastnostmi (SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3) po kalcinaci. Kalcinací se také snížil obsah alkálií a SO_3 , které mohou mít negativní vliv na ASR. Kalcinovaná křemelina má větší obsah reaktivního SiO_2 i celkový obsah SiO_2 , ovšem poměr celkového obsahu SiO_2 k obsahu reaktivního SiO_2 se snížil. Tato změna je způsobena přechodem části amorfního SiO_2 do krystalické formy [21].

Z výsledků RTG difraktometrie lze vyhodnotit rozdíly v mineralogickém složení přírodní a kalcinované křemeliny. Přírodní křemelina se skládá z největšího podílu opálu a dále z menších podílů amorfního albitu a kalcitu. V krystalické formě byl zaznamenán jílový minerál montmorillonit. V kalcinované křemelině byly zaznamenány minerály cristobalit, křemen a anortit. Porovnáním obou vzorků bylo vidět zlepšení pravidelné struktury křemeliny po kalcinaci [21].

Mikrostruktura malt byla zkoumána po 14 dnech zrání pomocí REM snímků vzorků z malt s 20 % křemeliny. Na snímku z REM malty s 20 %

přírodní křemeliny lze pozorovat jehlicovité krystaly hydroxidu vápenatého, C–S–H gely a hexagonální krystaly ettringitu. Ve struktuře lze pozorovat póry o velikosti 5 μm mezi zrny cementu. C–S–H gely vyvinuté v mikrostruktuře malt s 20 % kalcinované křemeliny jsou menší a mají nepravidelný tvar. Stejně jako u vzorku přírodní křemeliny lze pozorovat jehlicovité krystaly hydroxidu vápenatého a hexagonální krystaly ettringitu. Mikrostruktura je kompaktnější než v případě malty s přírodní křemelinou [21].

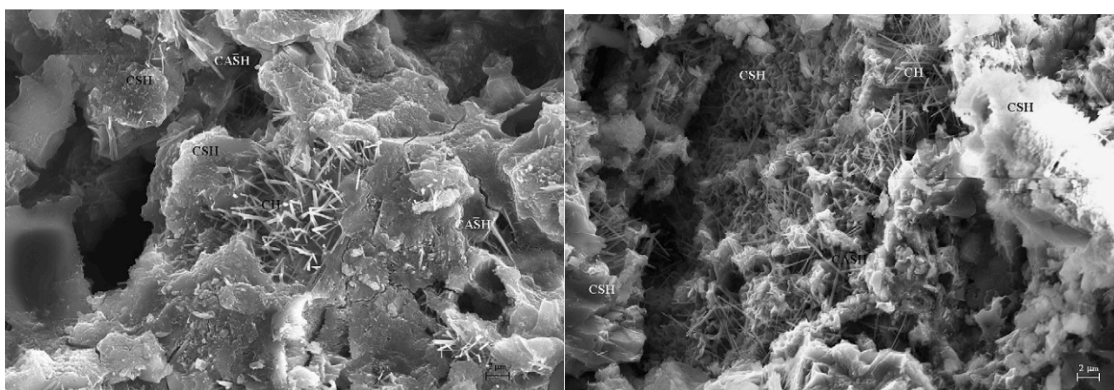
Důležitou vlastností křemeliny je nízká měrná hmotnost, která se po kalcinaci snížila z původních 2,54 g/cm^3 na 2,52 g/cm^3 [21].

Po pomletí bylo dosaženo největšího měrného povrchu u přírodní křemeliny (5430 cm^2/g), dále u kalcinované křemeliny (4100 cm^2/g) a u portlandského slínku (3247 cm^2/g) [21].

Tabulka 9: Mechanické vlastnosti zatvrdlých malt

Receptura	f_c po 2 dnech [MPa]	f_c po 7 dnech [MPa]	f_c po 28 dnech [MPa]
Referenční	22,4	37,3	48,5
5 % přírodní křemelina	22,3	35,9	47,1
10 % přírodní křemelina	22,8	36,7	47,9
20 % přírodní křemelina	15,1	26,0	33,8
5 % kalc. křemelina	22,0	35,0	47,5
10 % kalc. křemelina	22,3	34,3	49,2
20 % kalc. křemelina	19,3	33,6	48,2

Pucolánová reakce a pevnostní charakteristiky jsou ovlivněny množstvím přidané křemeliny. Křemelina jako pucolán reaguje s hydroxidem vápenatým za vzniku C–S–H gelů. U vzorků s obsahem křemeliny 5 a 10 % jsou pevnosti srovnatelné s referenčními. V případě vzorků s 20 % přírodní křemeliny je nižší pevnost způsobena vysokým měrným povrchem a adsorpcí většího množství vody v povrchové mikrostruktuře frustul, kterou nelze využít k hydrataci. Nicméně, v případě vzorků s 20 % kalcinované křemeliny jsou pevnosti srovnatelné s pevnostmi referenčních vzorků. Je to způsobeno natavením povrchové mikrostruktury frustul při kalcinaci, díky čemuž nedochází k adsorpci vody a voda absorbovaná v pórech je využita k hydrataci. V případě vzorku s přírodní křemelinou můžeme pozorovat pórovitou strukturu, zatímco u vzorku s kalcinovanou křemelinou je struktura kompaktnější [21].



Obr. 4 Snímky z REM; vlevo vzorek s 20 % přírodní křemelina; vpravo vzorek s 20 % kalcinované křemeliny [21]

Kalcinací se přeměnila struktura křemeliny na pravidelnější, zvýšila se průměrná velikost částic a obsah reaktivního SiO_2 , ovšem došlo ke snížení měrného povrchu a měrné hmotnosti [21].

Křemelina zvyšuje chemickou odolnost cementových kompozitů, protože redukuje obsah alkálií a zvyšuje obsah oxidu křemičitého [21].

Pevnosti klesají se zvyšujícím se měrným povrchem, kvůli většímu množství adsorbované vody na povrchu částic přírodní křemeliny. Kalcinací křemeliny se tento problém částečně odstraňuje, protože dochází ke zmenšení měrného povrchu, změně struktury a tím ke snížení adsorpce vody [21].

Přírodní křemelina je použitelná v maximálním množství do 10 %, jelikož při vyšším obsahu dochází ke snížení pevností. Kalcinace křemeliny se ukázala jako výhodná vzhledem ke snížení adsorpce vody a možnosti použít až 20 % křemeliny ve směsi s cementem. Při použití většího množství než 10 % přírodní křemeliny je nutné počítat s pomalým vývojem pevností a dobou zrání delší než 28 dní, zatímco při použití více než 10 % kalcinované křemeliny jsou 28 denní pevnosti srovnatelné s ostatními vzorky [21].

A.11.2 Použití křemeliny jako lehkého kameniva v mezerovitém betonu

Tato studie se zabývá použitím křemeliny (původem z Thajska), pemzy a recyklátu z pórobetonu jako lehkého kameniva v lehkých mezerovitých betonech. Výhodami použití lehkého kameniva je výrazné snížení hmotnosti

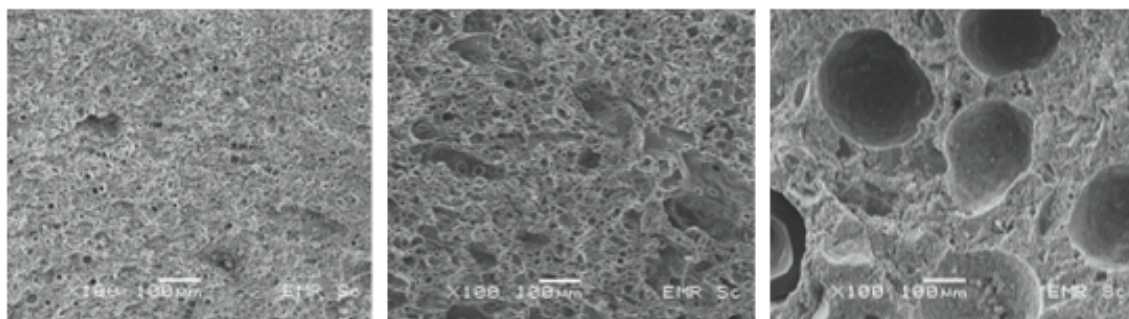
konstrukce, zvýšení odolnosti proti požáru, velmi dobré tepelné a akustické izolační vlastnosti [22].

Mezerovitý beton se vyznačuje absencí jemných podílů kameniva a pórovitou strukturou, která je propustná pro vodu a vzduch. Používá se pro výrobu propustné dlažby, jako materiál na protihlukové stěny a jako tepelná nebo akustická izolace [22].

Jako pojivo byl použit portlandský cement. Jako kamenivo byla použita křemelina (DA), pemza (PA) a recyklát z pórobetonu (RA). Pro výzkum byla použita frakce kameniva 4,8 – 9,5 mm [22].



Obr. 5 Lehká pórovitá kameniva; zleva: křemelina, pemza, pórobetonový recyklát [22]



Obr. 6 Snímky z REM povrchové struktury kameniv; zleva: křemelina, pemza, pórobetonový recyklát [22]

Směsi byly vyrobeny s konstantní dávkou kameniva a různými dávkami cementové kaše (15, 20 a 25 obj. %). Cementová kaše byla vyrobena s konstantním vodním součinitelem 0,24 a konstantní dávkou superplastifikační přísady 1,25 % z hmotnosti cementu [22].

Nejprve byla smíchána cementová pasta, do které bylo po zamíchání přidáno kamenivo a směs byla znovu zamíchána. Z namíchaných směsí byly vyrobeny válcová tělesa o průměru 100 mm a výšce 200 mm [22].

Tabulka 10: Složení mezerovitých betonů [22]

Receptura	Kamenivo [kg/m ³]	Cement [kg/m ³]	Voda [kg/m ³]	Superplastifikační přísada [kg/m ³]
DA – 15	740	269	64,6	3,35
DA – 20	740	359	86,1	4,47
DA – 25	740	448	107,6	5,59
PA – 15	740	269	64,6	3,35
PA – 20	740	359	86,1	4,47
PA – 25	740	448	107,6	5,59
RA – 15	630	269	64,6	3,35
RA – 20	630	359	86,1	4,47
RA – 25	630	448	107,6	5,59

Byly stanoveny fyzikální vlastnosti lehkých kameniv a na zkušebních tělesech byly provedeny zkoušky mechanických vlastností, dále byl stanoven objem pórů a tepelná vodivost [22].

Sypná hmotnost použitých lehkých kameniv je velmi podobná, její hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11. Výrazný rozdíl je v nasákavosti, kde křemelina dosahuje 114 %, což je skoro dvojnásobná hodnota oproti nasákavosti 60 % u kameniva pemzy. Nasákavost pórobetonu je 74,5 %. Rozdílná mikrostruktura kameniv je zobrazena na obrázku 6 [22].

Tabulka 11: Fyzikální vlastnosti lehkých kameniv [22]

Vlastnost	DA	PA	RA
Sypná hmotnost [kg/m ³]	346	353	361
Nasákavost [%]	114,1	60,3	74,5

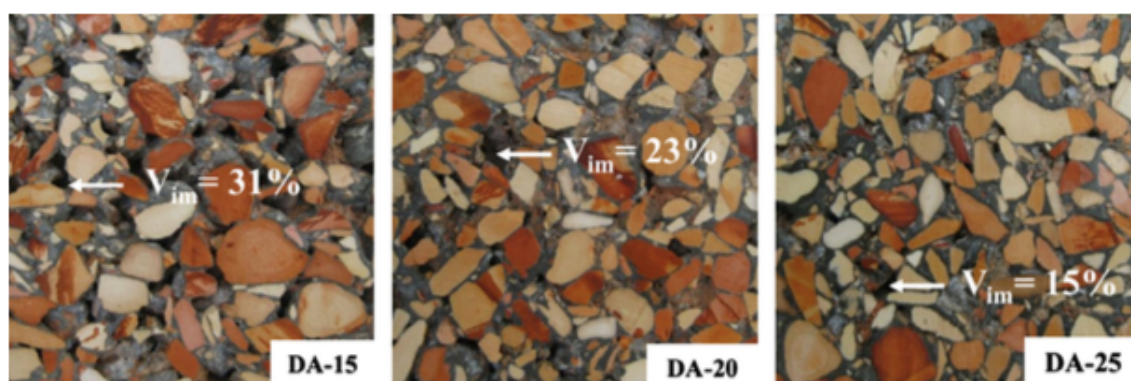
Zvýšením objemu cementové kaše z 15 obj. % na 25 obj. % došlo ke zvýšení pevnosti, objemové hmotnosti, součinitele tepelné vodivosti a ke snížení mezerovitosti. Po 7 dnech zrání dosáhly mezerovité betony asi 80 % hodnot 28 denních pevností. Nejvyšších pevností bylo dosaženo u mezerovitého betonu s křemelinou (3,20 – 5,99 MPa) [22].

Objemové hmotnosti jsou závislé na množství cementové kaše ve směsi, která určuje také mezerovitost směsi a má velký vliv na součinitel tepelné vodivosti. Vyšší dávka cementové kaše znamená vyšší objemovou hmotnost, nižší mezerovitost a výrazné zvýšení součinitele tepelné vodivosti. Nejlepších hodnot bylo dosaženo u mezerovitého betonu s křemelinou, až na nižší

mezerovitost, i přesto byla objemová hmotnost nižší. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 12 [22].

Tabulka 12: Vlastnosti mezerovitých betonů [22]

Receptura	f_c po 7 dnech [MPa]	f_c po 28 dnech [MPa]	Mezerovitost [%]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]
DA – 15	2,65	3,20	28,1	558	0,16
DA – 20	3,79	4,68	21,4	644	0,19
DA – 25	5,10	5,99	15,5	740	0,23
PA – 15	1,94	2,47	31,8	602	0,16
PA – 20	2,14	3,50	24,5	690	0,19
PA – 25	3,88	4,30	19,1	765	0,24
RA – 15	2,26	2,62	29,7	602	0,17
RA – 20	2,56	3,43	23,6	701	0,20
RA – 25	4,58	4,45	19,6	775	0,25



Obr. 7 Struktura výsledného mezerovitého betonu s křemelinou s rozdílnou dávkou cementového tmele [22]

Použití pórovitých kameniv v mezerovitém betonu výrazně snižuje jeho objemovou hmotnost a tepelnou vodivost oproti běžně používanému přírodnímu kamenivu. Lze dosáhnout až čtyřnásobného snížení objemové hmotnosti. Vzhledem k velmi nízkým hodnotám objemové hmotnosti, tepelné vodivosti a pevnosti v tlaku mohou být použity jako tepelně izolační materiál. Hodnoty součinitelů tepelné vodivosti 0,16 – 0,25 W/(m·K) jsou v porovnání s hodnotami pórobetonu mírně vyšší, ale jsou srovnatelné s hodnotami dosaženými u velmi lehkých betonů. Mezerovitý beton s křemelinou vykazoval lepší mechanické vlastnosti a nižší tepelnou vodivost. [22]

B. Experimentální část

B.1 Použité suroviny

B.1.1 Cement – CEM I 42,5 R Radotín

Jako pojivo pro přípravu zkušebních cementových malt byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R – výrobní závod Radotín (Českomoravský cement, a.s.).

Tabulka 13: Chemické složení cementu CEM I 42,5 R (Radotín)

Parametr	obsah [%]
SiO ₂	19,0
Al ₂ O ₃	4,31
Fe ₂ O ₃	2,40
TiO ₂	0,28
CaO	62,9
MgO	1,80
K ₂ O	0,82
Na ₂ O	0,14
P ₂ O ₅	0,16
Sířany vyjádřené jako SO ₃	3,24
Ztráta žíháním při 1100 °C	2,92

B.1.2 Superplastifikační přísada – Mapefluid N200

Jedná se o tekutou superplastifikační přísadu používanou do jakostních betonů. Mapefluid N200 je 40% vodní roztok aktivních polymerů, který rozptyluje cementové částice. Maximální dávka přísady je 1,5 % z hmotnosti cementu. V experimentu byl použit z důvodu vysoké nasákavosti křemeliny, která má velký vliv na konzistenci čerstvé cementové malty. Do směsi s náhradou cementu křemelinou byl přidáván pro dosažení stejné konzistence jako u referenční směsi a pro zachování konstantního vodního součinitele, jehož změna by mohla mít negativní vliv na konečné pevnosti vzorků. [25]

TECHNICKÉ VLASTNOSTI (typické hodnoty)	
SPECIFIKACE	
Konzistence	tekutá
Barva	hnědá
Objemová hmotnost	1,2 ± 0,03 kg/l při +20°C
Obsah pevných látek	40 ± 2 %
Hodnota pH	9,6
Specifický účinek	Značná redukce záměsové vody popř. zlepšená zpracovatelnost betonu.
Souběžný účinek	Počáteční zpomalení hydratace cementu, zachování zpracovatelnosti při vyšším dávkování
Klasifikace	vysoce jakostní obsah záměsové vody snižující superplastifikátor v souladu s EN 934-2 tabulky 3.1 a 3.2
Obsah chloridů	Žádný
Skladovatelnost	12 měsíců. Chraňte před mrazem.
Zdravotní závadnost dle EC 99/45	NE
Celní zatřídění	3824 40 00

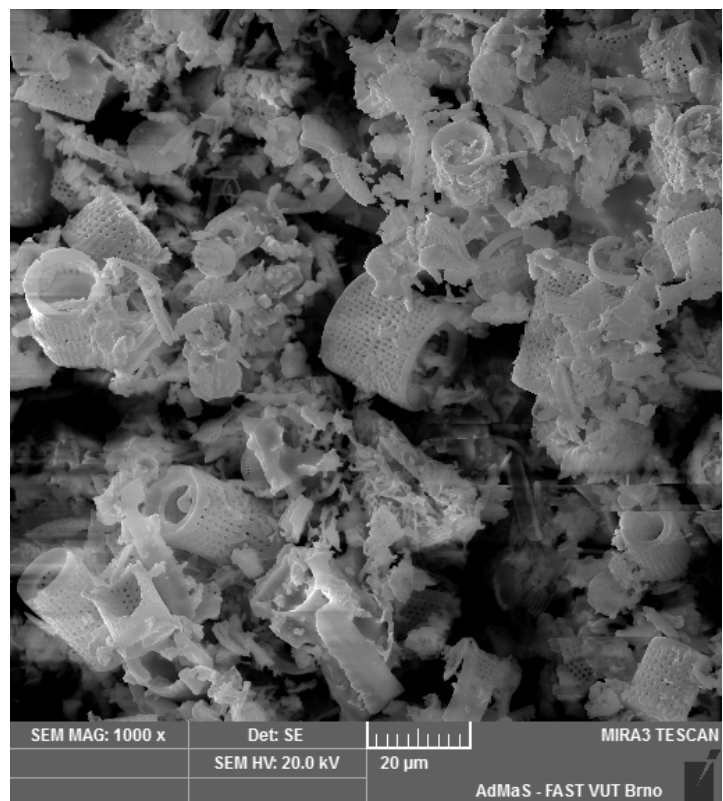
Obr. 8 Mapefluid N200 – technický list [25]

B.1.3 Křemelina – ENORANDALL 3

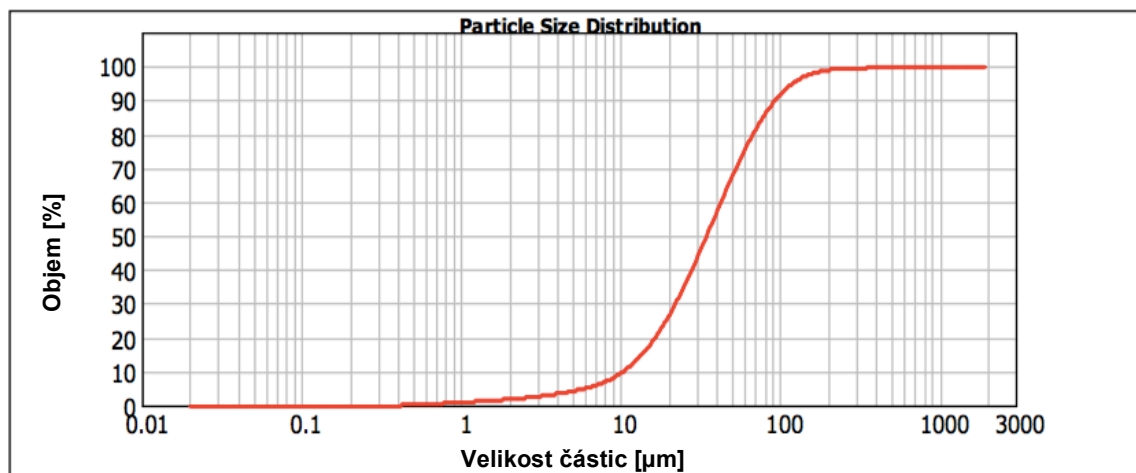
Tento výrobek italské společnosti DAL CIN je primárně určen pro jemnou filtraci v potravinářském průmyslu (výroba alkoholických nápojů). Jedná se o bílou křemelinu upravenou kalcinací s přidavkem Na_2CO_3 . Hodnota pucolánové aktivity křemeliny ENORANDALL 3 je 1914 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /1 g pucolánu. Chemické složení je uvedeno v tabulce 14. Struktura frustul křemeliny je na snímku z REM, obr. 10. Přístrojem Malvern Mastersizer 2000 byla stanovena distribuce částic laserovou difrakcí. Výsledky distribuce částic: $d_{10} = 10,351 \mu\text{m}$; $d_{50} = 34,432 \mu\text{m}$; $d_{90} = 92,695 \mu\text{m}$. Křivka zrnitosti a distribuce částic jsou zobrazeny v grafech, obr. 11 a obr. 12.

Tabulka 14: Chemické složení křemeliny ENORANDALL 3 [%] [26]

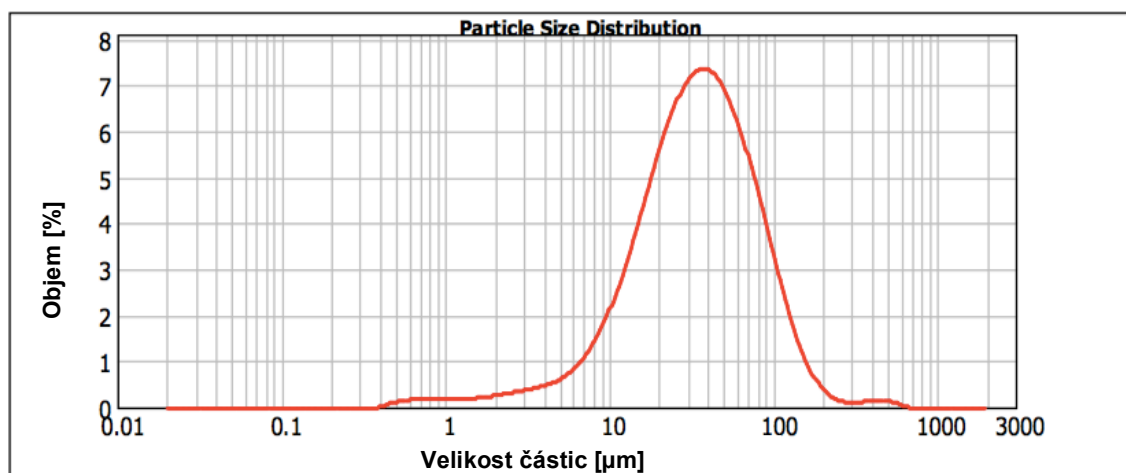
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	ZŽ
91–93	0,5–1,0	0,1–0,4	0,2–0,4	2,5–4,5	0,1–0,5	0,1–0,2	0,2



Obr. 9 ENORANDALL 3, snímek z REM, zvětšení 1000× Foto: P. Bayer



Obr. 10 ENORANDALL 3, křivka zrnitosti



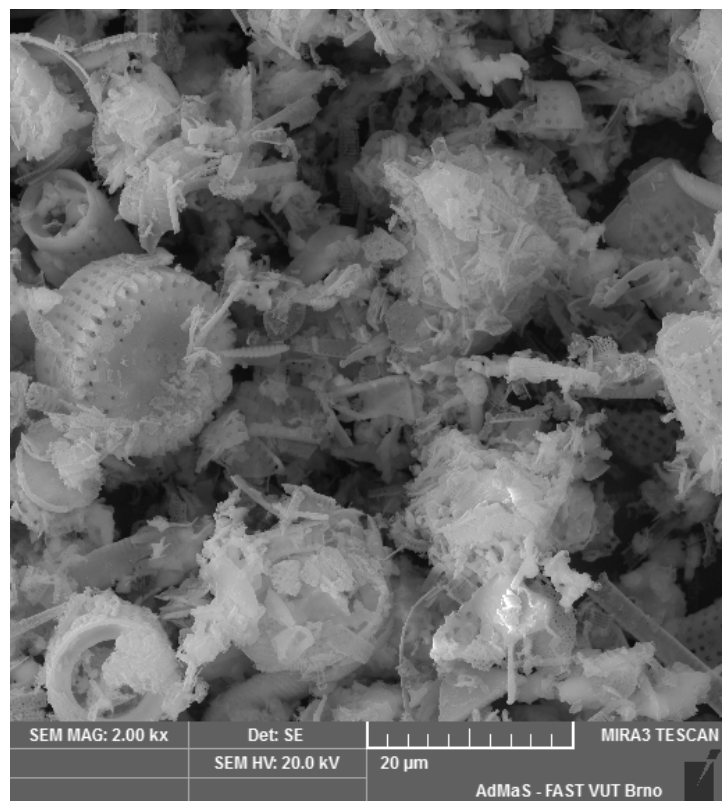
Obr. 11 ENORANDALL 3, distribuce částic

B.1.4 Křemelina – Enorandall 7

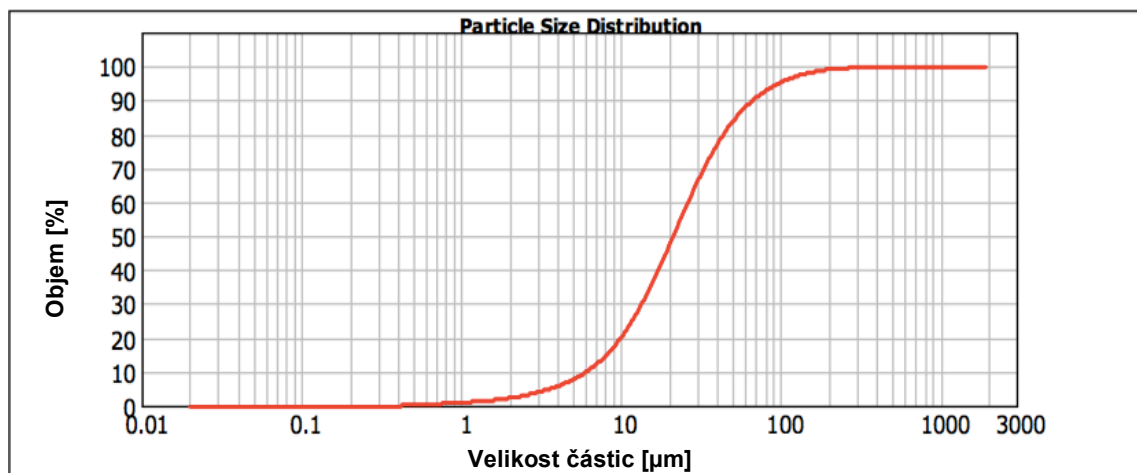
Jedná se také o výrobek italské společnosti DAL CIN a je primárně určen pro konečnou filtraci v potravinářském průmyslu (výroba alkoholických nápojů). Jedná se o křemelinu se zabarvením do růžova upravenou kalcinací. Hodnota pucolánové aktivity křemeliny ENORANDALL 7 je 2059 mg Ca(OH)_2 /1 g pucolánu. Chemické složení je uvedeno v tabulce 15. Struktura frustul křemeliny je na snímku z REM, obr. 13. Přístrojem Malvern Mastersizer 2000 byla stanovena distribuce částic laserovou difrakcí. Výsledky distribuce částic: $d_{10} = 6,035 \mu\text{m}$; $d_{50} = 21,161 \mu\text{m}$; $d_{90} = 66,336 \mu\text{m}$. Křivka zrnitosti a distribuce částic jsou zobrazeny v grafech, obr. 14 a obr. 15.

Tabulka 15: Chemické složení křemeliny ENORANDALL 7 [%] [26]

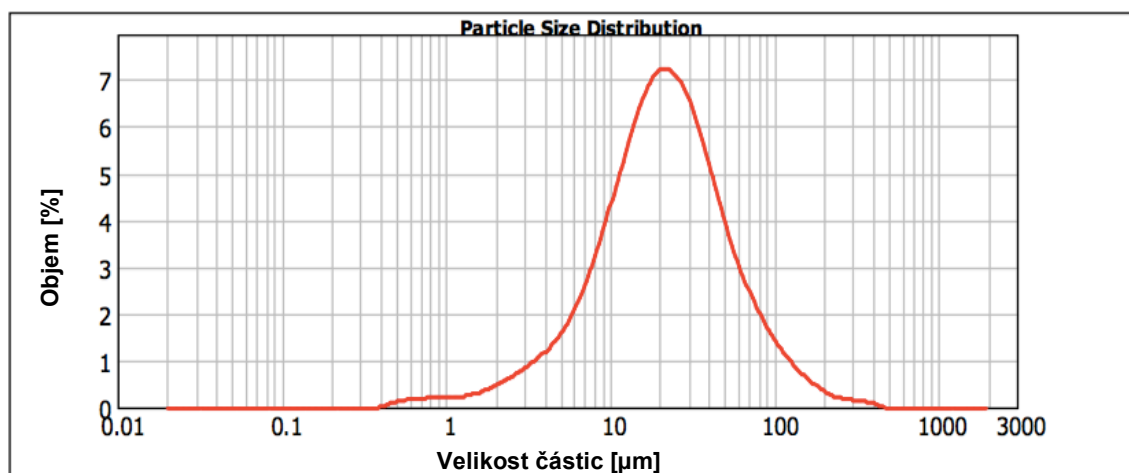
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	ZŽ
89–91	2,5–4,0	0,1–0,4	0,2–0,4	0,1–0,3	0,1–1,0	0,1–0,2	0,5



Obr. 12 ENORANDALL 7, snímek z REM, zvětšení 2000× Foto: P. Bayer



Obr. 13 ENORANDALL 7, křivka zrnitosti



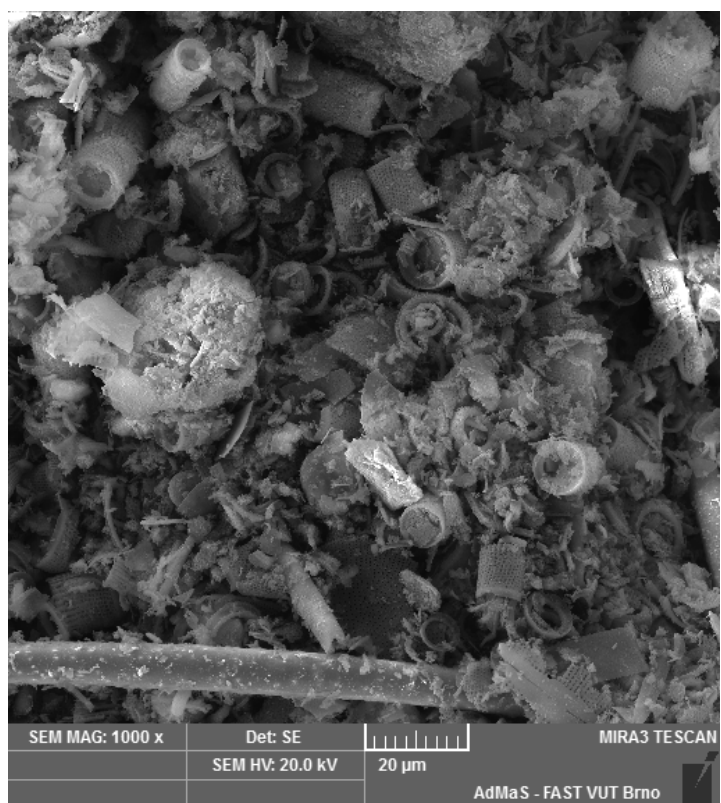
Obr. 14 ENORANDALL 7, distribuce částic

B.1.5 Křemelina filtrační F4

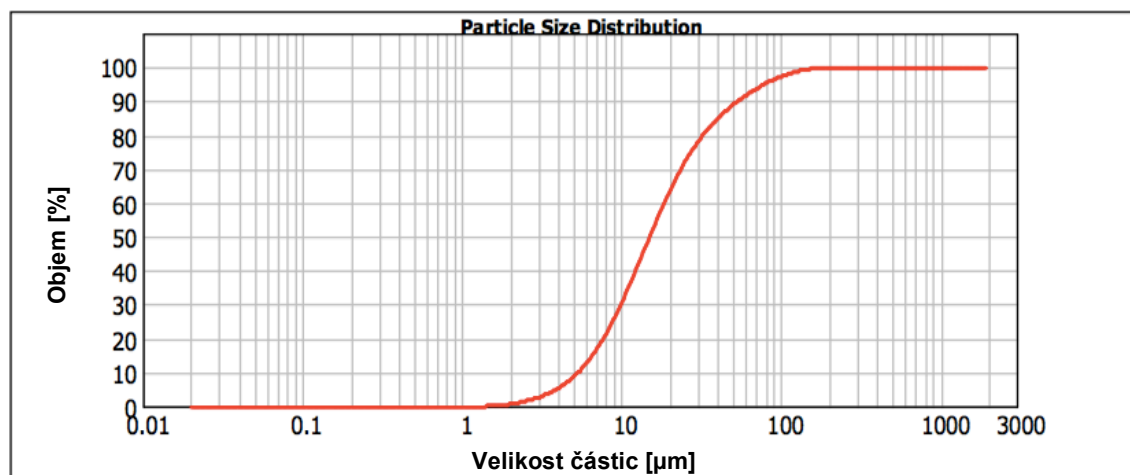
Filtrační křemelina F4 je výrobek firmy LB MINERALS, s.r.o. a jedná se o světle šedou křemelinu těžnou v Borovanech u Českých Budějovic. Křemelina F4 se primárně používá pro výrobu filtračních desek a při jemné filtraci v potravinářském průmyslu. Hodnota pucolánové aktivity filtrační křemeliny F4 je 1292 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /1 g pucolánu. Chemické složení je uvedeno v tabulce 16. Struktura frustul křemeliny je na snímku z REM, obr. 16. Přístrojem Malvern Mastersizer 2000 byla stanovena distribuce částic laserovou difrakcí. Výsledky distribuce částic: $d_{10} = 5,344 \text{ } \mu\text{m}$; $d_{50} = 14,928 \text{ } \mu\text{m}$; $d_{90} = 53,110 \text{ } \mu\text{m}$. Křivka zrnitosti a distribuce částic jsou zobrazeny v grafech, obr. 17 a obr. 18.

Tabulka 16: Chemické složení křemeliny filtrační F4 [%]

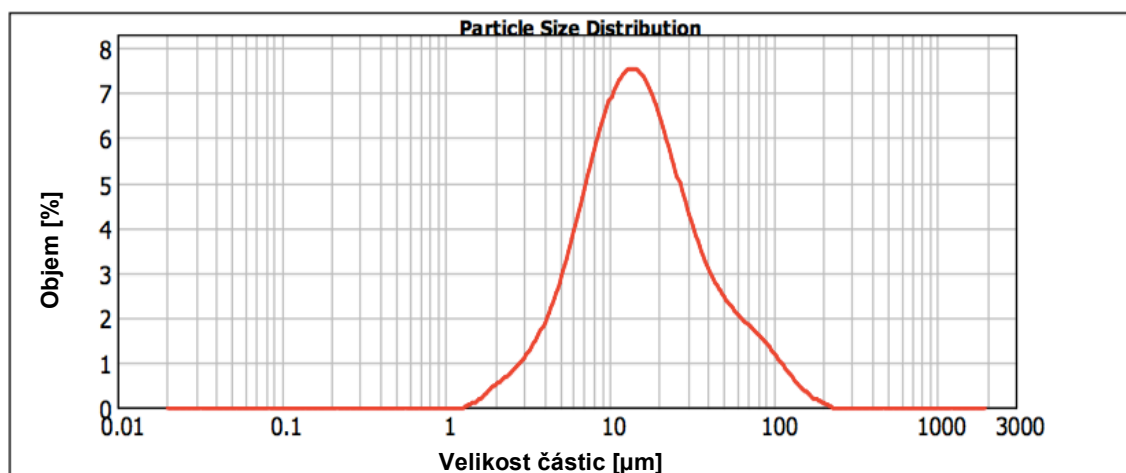
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	ZŽ
77	14	1,7	7



Obr. 15 Křemelina filtrační F4, snímek z REM, zvětšení 1000× Foto: P. Bayer



Obr. 16 Křemelina filtrační F4, křivka zrnitosti



Obr. 17 Křemelina filtrační F4, distribuce částic

B.1.6 Zkušební křemenný písek

Jako kamenivo byl použit zkušební křemenný písek pro přípravu malt (Filtrační písky, s.r.o.) dle normy ČSN 721200. Byly použity 3 frakce v hmotnostním poměru 1:1:1.

Tabulka 17: Sítový rozbor zkušebního křemenného písku

Velikost [mm]	Propad na sítích [%]		
	PG1	PG2	PG3
4,00	–	99,93	99,85
2,50	–	92,31	0,29
1,00	100,00	3,37	0,02
0,50	75,61	0,64	–
0,25	3,90	0,05	–
0,125	2,41	–	–
0,090	0,24	–	–
0,063	0,05	–	–
0,045	–	–	–

B.2 Použité zkušební metody

B.2.1 Stanovení konzistence čerstvé malty dle ČSN EN 1015–3

Stanovení konzistence bylo nejprve provedeno na vzorku referenční malty, výsledné hodnoty byly použity pro zjištění množství superplastifikační přísady, které bylo nutné přidat do malt s přísadou křemeliny. Superplastifikační

přísada byla postupně přidávána do malt s křemelinou až do doby, kdy byla dosažena stejná konzistence jako u referenční malty.

Pro stanovení konzistence čerstvých malt byl použit postup dle normy ČSN EN 1015–3. Před započítím zkoušky je nutné otřít vlhkou tkaninou desku střešacího stolku a kovový kužel. Kovový kužel je umístěn do středu desky střešacího stolku a je naplněn maltou ve dvou vrstvách. Každá vrstva je zhutněna 10 lehkými údery dusadla tak, aby došlo k rovnoměrnému naplnění kužele maltou. Odstraní se nástavec a přebytečná malta se seřízne pomocí špachtle. Po 15 s se kovový kužel opatrně zvedne a malta se rozlije 15 rovnoměrnými zdvihy střešacího stolku po dobu 15 s. Průměr vzniklého koláče se změří ve dvou navzájem kolmých směrech, ze kterých se vypočte průměrná hodnota. Provedou se 2 měření, jejichž hodnoty se nesmí lišit o více než 10 %.

Tabulka 18: Složení cementových malt

Suroviny	Ref.	Eno3	Eno7	KB – F4
CEM I 42,5 R [g]	450	405	405	405
Zkuš. křem. písek [g]	1350	1350	1350	1350
EnoRandall 3 [g]	–	45	–	–
EnoRandall 7 [g]	–	–	45	–
Křemelina Borovany [g]	–	–	–	45
MAPEFLUID N200 [ml]	–	4,25	4,25	4,25
voda [g]	225	225	225	225
w [–]	0,5	0,5	0,5	0,5

B.2.2 Zhotovení zkušebních těles pro zkoušky pevností

Pro každou recepturu byly vyhotoveny 4 sady o 3 zkušebních vzorcích. Z každé záměsi byla vyrobena 1 sada zkušebních vzorků o rozměrech 40×40×160 mm.

Každá záměs byla vyhotovena dle receptur uvedených v tabulce 18. Jednotlivé složky včetně vody byly naváženy na elektronické váze s přesností na 0,1 g. Příprava zkušebních malt probíhala bez použití míchačky k tomu určené v ČSN EN 196–1. Suché složky byly nejprve homogenizovány ručním mícháním a až poté byla přidána záměsová voda společně se superplastifikační přísadou (pokud je součástí receptury). Předem připravené formy byly naplněny

maltou ve dvou vrstvách, přičemž každá vrstva byla zhutněna 10 rázy z výšky cca 30 mm na tuhou podložku. Přebytečná malta se odstranila pomocí špachtle a povrch zkušebních těles se zarovnal s horním okrajem formy. Po 24 hodinách jsou tělesa vyjmuta z forem a umístěna do vodního uložení až do doby zkoušení.

B.2.3 Stanovení objemové hmotnosti zatvrdlé malty dle ČSN EN 196–1

Zkušební tělesa se byla vyjmuta 15 minut pře provedením zkoušky z vodního uložení a otřou se vlhkou tkaninou. Změří se rozměry zkušebních těles (výška, šířka a délka) a tělesa se zváží. Z rozměrů zkušebních těles se vypočítá jejich objem a výsledná hodnota objemové hmotnosti se vypočítá jako poměr hmotnosti tělesa k objemu tělesa. Z vypočtených hodnot objemové hmotnosti se stanoví průměrná hodnota a zaokrouhlí se na 10 kg/m^3 .

B.2.4 Stanovení pevnosti zatvrdlé malty v tahu za ohybu dle ČSN EN 196–1

Od každé receptury byla zkoušena jedna sada zkušebních těles po různých dobách zrání. Pevnosti v tahu za ohybu byly zkoušeny po 28, 56 a 90 dnech zrání ve vodním prostředí.

Stanovení pevností bylo provedeno v souladu s normou ČSN EN 196–1. Zkušební tělesa se vyjmou z vodního prostředí 15 minut před započítáním zkoušky a přebytečná voda se otře vlhkou tkaninou. Do zkušebního stroje se vloží přípravek pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu. Na válcové podpory zkušebního přípravku se položí zkušební těleso kolmo na směr hutnění. Zatížení se zvyšuje rychlostí $50 \pm 10 \text{ N/s}$ až do porušení zkušebního tělesa. Zaznamená se síla potřebná k porušení zkušebního tělesa. Z vypočtených hodnot pevností v tahu za ohybu se stanoví průměrná hodnota.

B.2.5 Stanovení pevnosti zatvrdlé malty v tlaku dle ČSN EN 196–1

Pro stanovení pevnosti v tlaku se použijí obě poloviny zkušebních těles ze zkoušky pevnosti v tahu za ohybu.

Stanovení pevností bylo provedeno v souladu s normou ČSN EN 196–1. Do zkušebního stroje se vloží přípravek pro zkoušku pevnosti v tlaku. Poloviny zkušebních těles se do přípravku vkládají kolmo na směr hutnění. Rychlost zatěžování těles by měla být v rozmezí 2400 ± 200 N/s. Tělesa se zatěžují až do porušení, výsledná síla při porušení se zaznamená. Z vypočtených hodnot pevností v tlaku pro 6 zkoušených polovin zkušebních těles se stanoví průměrná hodnota pevnosti v tlaku.

B.3 Výsledky a diskuze

B.3.1 Konzistence dle ČSN EN 1015–3

U referenční malty byla naměřena průměrná hodnota rozlití na střešacím stolku po dvou měřeních 132 mm. U ostatních malt s 10 % křemeliny byla naměřena hodnota asi 110 mm. Srovnatelné konzistence s referenční maltou bylo dosaženo až při přidání 4,25 ml superplastifikační přísady. Množství přidané superplastifikační přísady 4,25 ml bylo u všech 3 čerstvých malt s příměsí 10 % křemeliny (ENORANDALL 3, ENORANDALL 7, F4) stejné, pro dosažení konzistence jako u čerstvé referenční malty. Toto dávkování (0,95 % z hmotnosti pojiva) je v souladu s doporučenou maximální dávkovou 1,5 % uvedenou v technickém listu superplastifikační přísady Mapefluid N200.

B.3.2 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech byly až na směs s křemelinou ENORANDALL 7 – 7,4 MPa velmi vyrovnané. Referenční směs a směs

s křemelinou F4 – 8,7 MPa a pevnost 8,5 MPa dosáhla směs s křemelinou ENORANDALL 3.

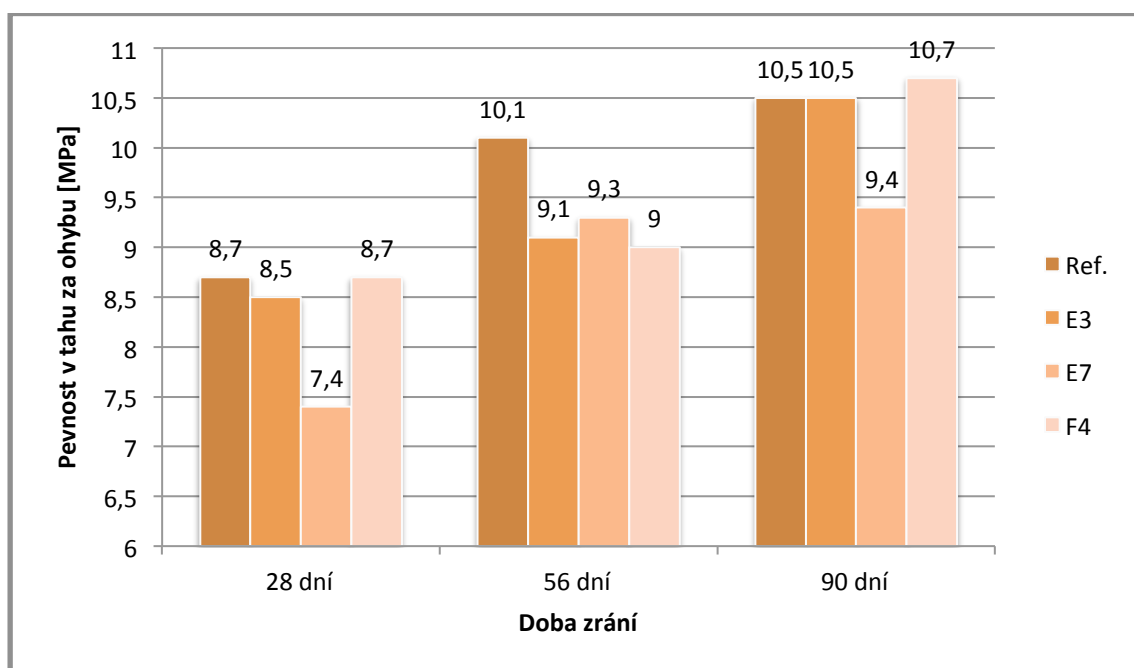
Pevnost v tahu za ohybu se po 56 dnech výrazně zvýšila pouze u referenční směsi na 10,1 MPa. Pevnosti ostatních směsí se také zvýšily. Pevnosti 9,3 MPa dosáhla směs s křemelinou ENORANDALL 7, pevnost 9,1 MPa byla naměřena u směsi s křemelinou ENORANDALL 3 a pevnosti 9,0 MPa bylo dosaženo u směsi s křemelinou F4.

K výraznému zvýšení pevností po 90 dnech došlo u směsi s křemelinou ENORANDALL 3 (10,5 MPa) a F4 (10,7 MPa), naopak u směsi s křemelinou se pevnost zvýšila pouze na 9,4 MPa. Referenční směs dosáhla pevnosti v tahu za ohybu 10,5 MPa.

Nárůst pevnosti v tahu za ohybu byl u směsí s křemelinou pomalejší, ale konečné pevnosti jsou srovnatelné s referenčními vzorky, kromě směsi s křemelinou ENORANDALL 7, kde vzhledem k dobrým pevnostem v tlaku došlo pravděpodobně k chybě při stanovení pevnosti v tahu za ohybu po 90 dnech.

Tabulka 19: Výsledné hodnoty pevností v tahu za ohybu

Receptura	Ref.	Eno3	Eno7	KB – F4
f_{cf} po 28 dnech [MPa]	8,7	8,5	7,4	8,7
f_{cf} po 56 dnech [MPa]	10,1	9,1	9,3	9,4
f_{cf} po 90 dnech [MPa]	10,5	10,5	9,4	10,7



Obr. 18 Graf vývoje pevnosti v tahu za ohybu v závislosti na době zrání a druhu použité křemeliny

B.3.3 Pevnost v tlaku

Referenční malta dosáhla po 28 dnech zrání pevnosti v tlaku 60,2 MPa a dle očekávání výrazně převyšovala pevnosti malt s křemelinou. Nejpomalejší nárůst pevnosti můžeme pozorovat u směsi s křemelinou ENORANDALL 3, která po 28 dnech dosáhla pevnosti v tlaku 44,4 MPa. Nižších pevností v tlaku ve srovnání s referenční maltou dosáhla i směs s křemelinou ENORANDALL 7 – 47,1 MPa. Nejlepších hodnot ze směsí s křemelinou dosáhla směs s křemelinou F4 – 51,1 MPa.

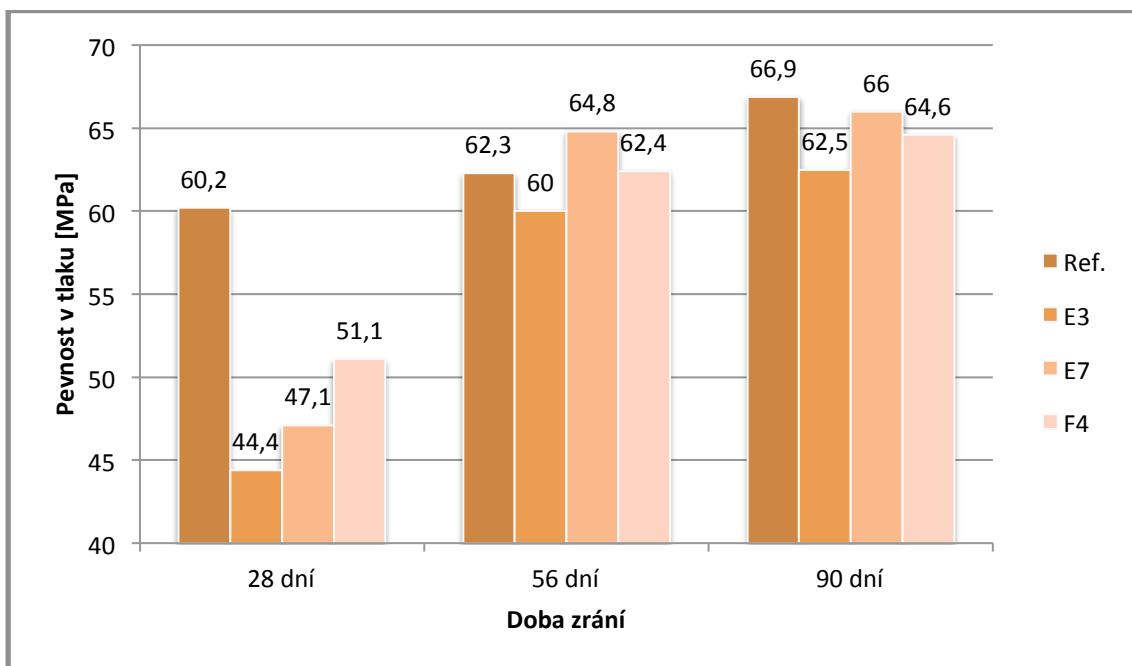
Po 56 dnech zrání došlo ke srovnání tlakových pevností. Nejvyšší pevnosti v tlaku 64,8 MPa dosáhla směs s křemelinou ENORANDALL 7 a spolu s pevností v tlaku 62,4 MPa dosažené směsí s křemelinou F4 překonali pevnost v tlaku 62,3 MPa referenční směsi. Nejnižší pevnost v tlaku 60,0 MPa byla naměřena u směsi s křemelinou ENORANDALL 3.

Po 90 dnech zrání došlo ještě k mírnému nárůstu pevností v tlaku u všech směsí. Nejvyšší pevnosti 66,9 MPa dosáhla referenční směs. Velmi podobné pevnosti 66,0 MPa bylo dosaženo u směsi s křemelinou ENORANDALL 7. Zhruba stejný nárůst pevnosti byl zaznamenán i u směsi s křemelinou F4 – 64,6 MPa a u směsi s křemelinou ENORANDALL 3 – 62,5 MPa.

Pomalejší nárůst pevností je způsoben pucolánovou reakcí amorfního SiO_2 s portlanditem vzniklým při hydrataci slínkových minerálů alitu a belitu.

Tabulka 20: Výsledné hodnoty pevností v tlaku

Receptura	Ref.	Eno3	Eno7	KB – F4
f_c po 28 dnech [Mpa]	60,2	44,4	47,1	51,1
f_c po 56 dnech [Mpa]	62,3	60,0	64,8	62,4
f_c po 90 dnech [Mpa]	66,9	62,5	66,0	64,6



Obr. 19 Graf vývoje pevnosti v tlaku v závislosti na době zrání a druhu použité křemeliny

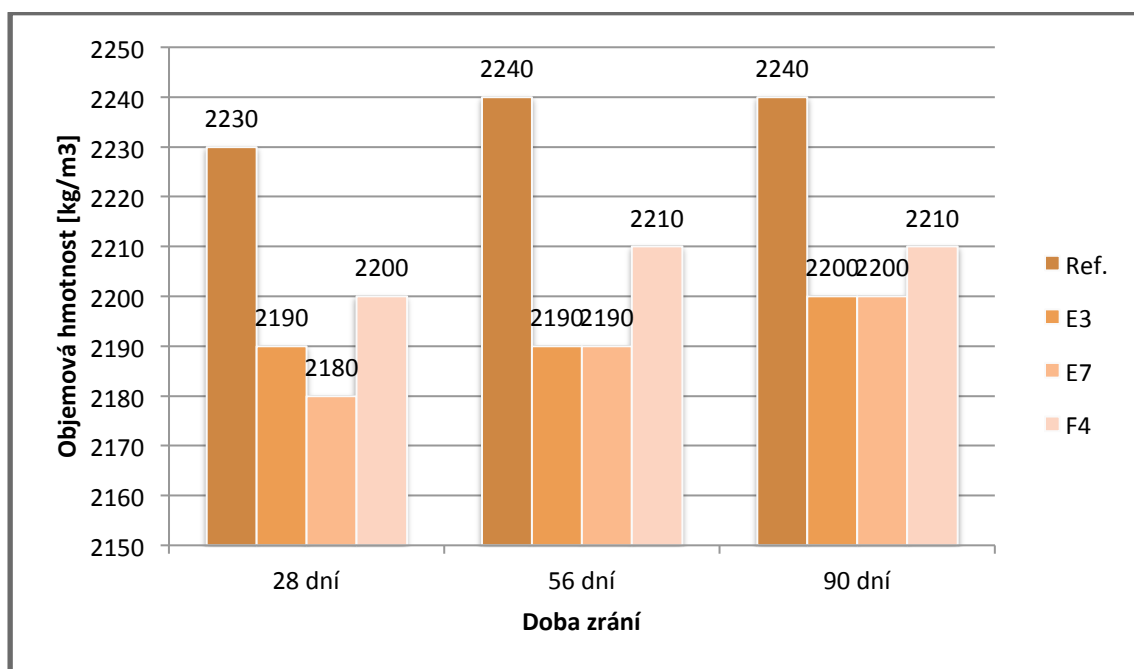
B.3.4 Objemová hmotnost zatvrdlých malt

Průměrná hodnota objemové hmotnosti zatvrdlé referenční malty je 2240 kg/m^3 . Z výsledků objemových hmotností zatvrdlých malt s 10 % křemeliny (ENORANDALL 3, ENORANDALL 7, F4) lze pozorovat snížení objemové hmotnosti oproti referenční maltě. Snížení objemové hmotnosti je dosaženo díky nízké sypané hmotnosti křemeliny, která je dána především vysokou pórovitostí frustul. Z technických listů filtračních křemelin lze vyčíst hodnoty objemových hmotností nasáklých křemelin, které jsou: 380 kg/m^3 pro ENORANDALL 3, 370 kg/m^3 pro ENORANDALL 7 a 650 kg/m^3 pro F4. Tyto hodnoty odpovídají i stanoveným objemovým hmotnostem zatvrdlých malt

s 10 % křemeliny. U směsi s křemelinou ENORANDALL 3 byla průměrná objemová hmotnost 2190 kg/m^3 , stejně jako u směsi s křemelinou ENORANDALL 7. U směsi s filtrační křemelinou F4 byla naměřena průměrná hodnota objemové hmotnosti 2210 kg/m^3 . Nárůst objemové hmotnosti u směsi s křemelinou F4 odpovídá hodnotám objemových hmotností nasáklých křemelin z technických listů. Vypočtené hodnoty objemových hmotností jsou uvedeny v tabulce 21.

Tabulka 21: Výsledné hodnoty objemových hmotností zatvrdlých malt

Receptura	Ref.	Eno3	Eno7	KB – F4
f_c po 28 dnech [kg/m^3]	2230	2190	2180	2200
f_c po 56 dnech [kg/m^3]	2240	2190	2190	2210
f_c po 90 dnech [kg/m^3]	2240	2200	2200	2210

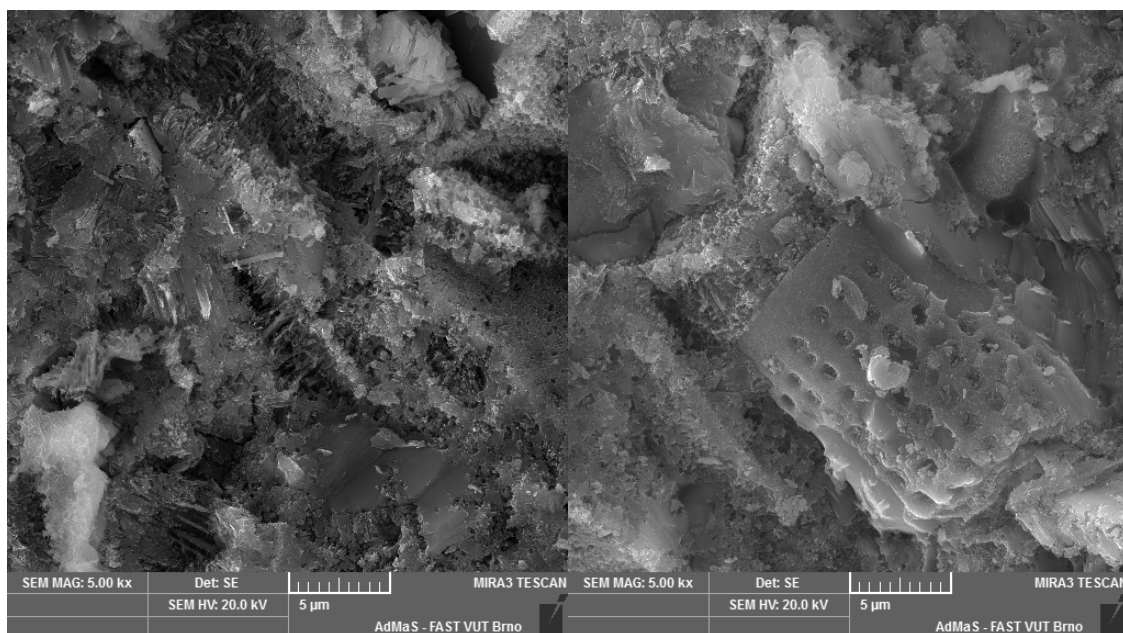


Obr. 20 Graf vývoje objemové hmotnosti v závislosti na době zrání a druhu použité křemeliny

B.3.5 Snímky z REM

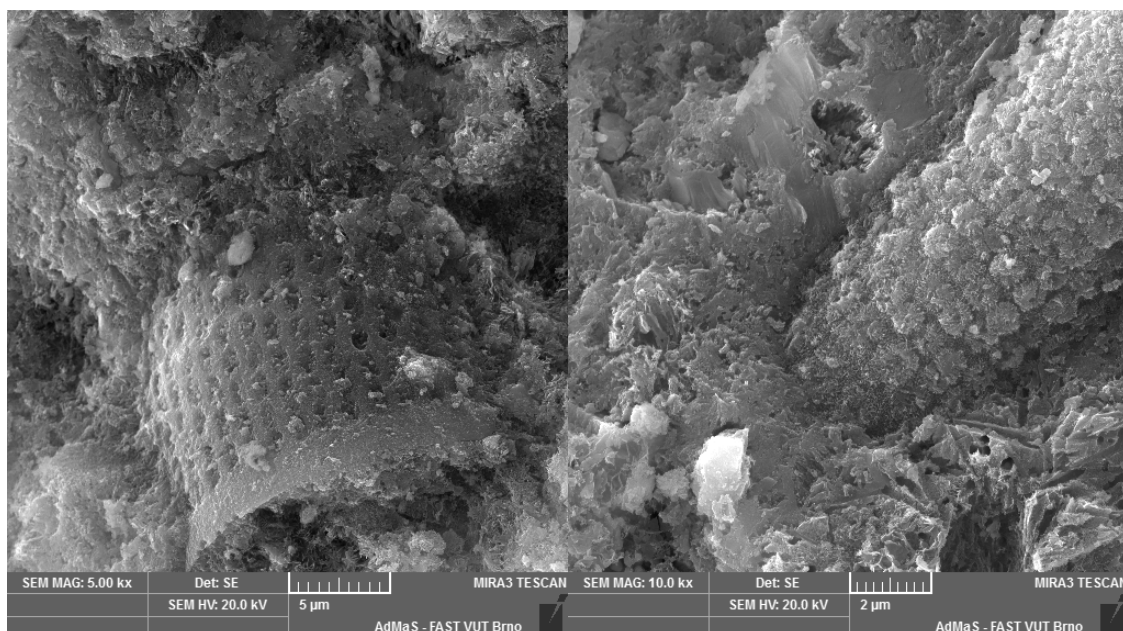
Na snímcích zatvrdlých malt z rastrovacího elektronového mikroskopu můžeme vidět rozdílné mikrostruktury jednotlivých receptur. V mikrostrukturu malt s křemelinou lze dobře rozlišit jednotlivé frustuly. U referenčního vzorku lze

dobře pozorovat jehlicovité krystaly portlanditu, zatímco u vzorků s křemelinou došlo k pucolánové reakci portlanditu s amorfním SiO_2 za vzniku C–S–H gelů.



Obr. 21 Referenční malta,
snímek z REM, zvětšeno 5000×
Foto: P. Bayer

Obr. 22 Malta s 10 %
křemeliny ENORANDALL 3,
snímek z REM, zvětšeno 5000×
Foto: P. Bayer



Obr. 23 Malta s 10 %
křemeliny ENORANDALL 7,
snímek z REM, zvětšeno 5000×
Foto: P. Bayer

Obr. 24 Malta s 10 %
křemeliny filtrační F4, snímek
z REM, zvětšeno 10000×
Foto: P. Bayer

B.3.6 Nasákavost

Hodnoty nasákavosti byly zkoušeny na jednom tělese od každé receptury. Tělesa vytažená z vody se zvažila a v sušárně se vysušila do konstantní hmotnosti. Výsledné hodnoty nasákavosti jsou velmi podobné u všech receptur. Nejvyšší hodnoty nasákavosti dosáhla receptura s křemelinou ENORANDALL 3. Dle výsledků lze říci, že přídavek křemeliny nemá velký vliv na nasákavost cementových malt.

Tabulka 22: Hodnoty nasákavosti pro jednotlivé receptury [%]

Receptura	Ref.	Eno3	Eno7	KB – F4
Nasákavost [%]	7,4	7,7	7,3	7,3

Závěr

Jedním z hlavních cílů bakalářské práce bylo poskytnout přehled o základních charakteristikách a vzniku křemeliny. Pro zpracování přehledu bylo záměrem čerpat především z vědeckých článků a zahraniční literatury dostupných z vědeckých databází. Pozornost byla věnována rozsivkám, hnědým řasám, které jsou hojně rozšířeny především ve vodním prostředí. Schránky rozsivek mají velmi jemnou pórovitou strukturu a jsou tvořeny amorfním SiO_2 . Po odumření řas dochází k usazení schránek na dně vodního prostředí a působením dalších procesů vzniká sedimentární hornina, kterou nazýváme křemelina. Tento proces probíhá téměř nepřetržitě, tudíž lze říci, že křemelina je do jisté míry obnovitelný přírodní zdroj. Dále byla křemelina rozdělena do dvou kategorií dle druhu rozsivek a prostředí vzniku na křemelinu mořského původu a křemelinu jezerního (kontinentálního) původu. Naleziště křemeliny mořského původu jsou rozsáhlejší, ale méně časté, křemelina z nich obsahuje méně nečistot a v nejčistší formě ji lze získat s obsahem až 97 % amorfního SiO_2 , nicméně většina těžené křemeliny pochází z nalezišť jezerního původu. Křemelina je ceněná především pro její vysoký obsah amorfního SiO_2 , vysokou pórovitost a nasákavost, dobrou tvrdost schránek z nichž je tvořena (křemelina jako celek má tvrdost poměrně nízkou a je drobivá), nízkou sypnou hmotnost, chemickou inertnost a velkou jemnost částic. Křemelina se před použitím musí šetrně podrtit, aby se nepoškodila struktura frustul a zůstaly zachovány jejich vlastnosti. Pro některé aplikace například filtraci se křemelina upravuje kalcinací.

Vysoké pórovitosti se úspěšně využívá při filtraci tekutin v potravinářském průmyslu, minerálních olejů a v chemickém průmyslu. Rozvíjející se možností použití je oblast nanotechnologií a farmaceutického průmyslu. Ve stavebnictví se křemelina využívá především pro její pucolánové vlastnosti dané vysokým obsahem amorfního SiO_2 . Primární využití křemeliny je jako reaktivní příměs do cementových kompozitů, kdy nahrazuje část cementu. Příznivý vliv má hlavně na vlastnosti zatvrdlých malt. Výsledky citovaných vědeckých článků prokázali zlepšení chemické odolnosti, vytvoření

kompaktnější struktury, částečné snížení objemové hmotnosti, zlepšení odolnosti proti vápenatým výkvětům (pucolánová reakce portlanditu s amorfním SiO_2) a zvýšení měrného povrchu dle Blaina při zachování stejných pevností jako u referenčních vzorků. Díky vysoké pórovitosti křemeliny a její struktuře vykazuje velmi dobré tepelně izolační vlastnosti a používá se jako tepelná izolace, ale je nutné ji velmi dobře chránit před vlhkostí, jelikož má vysokou nasákavost. Nasákavost má velmi negativní vliv na konzistenci, protože křemelina má tendenci nasáknout vodu do své pórovité struktury, a tím výrazně omezuje možnosti zpracování čerstvých malt.

Na využití křemeliny ve stavebnictví navazuje experimentální část práce. Cílem bylo stanovit objemovou hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku zatvrdlých malt s příměsí 10 % křemeliny v porovnání s referenční směsí vyrobenou dle ČSN EN 196–1. Byly testovány celkem 3 různé filtrační křemeliny od 2 různých výrobců z Itálie a České Republiky. Vzhledem k výše popsaným problémům s nasákavostí křemeliny bylo nejprve nutné ověřit možnost dosažení stejné konzistence čerstvých malt s příměsí křemeliny, které bylo dosaženo u referenční malty. Zároveň bylo žádoucí zachovat stejný vodní součinitel, aby nedošlo vlivem jeho zvýšení k negativnímu ovlivnění pevnostních charakteristik. K tomuto účelu byla využita superplastifikační přísada Mapefluid N200, jejímž přídavkem 0,95 % z hmotnosti pojiva bylo dosaženo stejné konzistence jako u referenční směsi. Konzistence byla stanovena na stříšacím stolku dle ČSN EN 1015–3. Následně byly dle jednotlivých receptur namíchány čerstvé maltové směsi a z nich vyrobeny zkušební tělesa $40 \times 40 \times 160$ mm. Na zatvrdlých maltách byla stanoveny po jednotlivých dobách zrání (28, 56, 90 dní) objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Objemová hmotnost byla mírně snížena u zkoušených malt s různými druhy křemelin oproti referenčním vzorkům, což odpovídá i výsledkům citovaných vědeckých výzkumů. Pevnosti v tahu za ohybu byly velmi vyrovnané po 28 a 90 dnech zrání až na směs s křemelinou ENORANDALL 7, která vykazovala nižší hodnoty. V případě 56denních pevností dosáhla výrazně vyšších hodnot referenční směs oproti ostatním směsím. Počáteční nárůst pevností v tlaku u zkoušených směsí byl

pomalejší v porovnání s referenčními hodnotami, ovšem už po 56 dnech zrání se pevnosti srovnávaly. Nejlepších výsledků pevnosti v tlaku po 90 dnech dosáhly vzorky referenční malty, nicméně hodnoty naměřené u směsi s křemelinou se blížily pevnostem referenční malty.

Při použití křemeliny jako příměsi je třeba brát v úvahu nižší nárůst počátečních pevností, nicméně koncové pevnosti byly srovnatelné s referenčními hodnotami. Objemové hmotnosti byly přidavkem křemeliny mírně sníženy. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u směsi s křemelinou ENORANDALL 7. Pro lepší interpretaci vlivu na vlastnosti cementových kompozitů by bylo vhodné provést experiment s různými dávkami jednotlivých křemelin.

Seznam použitých zdrojů

- [1] ZNACHOR, Petr. Rozsivky – podivuhodné řasy v krabičce. *Rozsivky – podivuhodné řasy v krabičce*. 2008, (1). Dostupné také z: www.avcr.cz/ziva
- [2] With or Without Salt—a Comparison of Marine and Continental-Lacustrine Diatomite Deposits. *With or Without Salt—a Comparison of Marine and Continental-Lacustrine Diatomite Deposits*. 2003, (Bulletin 2209–D). Dostupné také z: <http://pubs.usgs.gov/bul/b2209-d/>
- [3] History and Overview of the U.S. Diatomite Mining Industry, with Emphasis on the Western United States. *History and Overview of the U.S. Diatomite Mining Industry, with Emphasis on the Western United States*. 2003, (Bulletin 2209–E): 8. Dostupné také z: <http://pubs.usgs.gov/bul/b2209-e/>
- [4] FLOWER, Roger J. a David B. RYVES. Diatom preservation: differential preservation of sedimentary diatoms in two saline lakes. *Acta botanica Croatica*. 2009, (VOL 68, No 2). ISSN 0365-0588. Dostupné také z: <http://www.abc.botanic.hr/index.php/abc/article/view/129>
- [5] Mcs-2014-diato. [Http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/diatomite/](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/diatomite/) [online]. 2014 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/diatomite/mcs-2014-diato.pdf
- [6] Mcs-2015-diato. [Http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/diatomite/](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/diatomite/) [online]. 2015 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/diatomite/mcs-2015-diato.pdf
- [7] Diatomite. [Http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/diatomite/](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/diatomite/) [online]. 2010 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/diatomite/myb1-2010-diato.pdf
- [8] Diatomite. [Http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/diatomite/](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/diatomite/) [online]. 2012 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/diatomite/myb1-2012-diato.pdf
- [9] PARKINSON, John a Richard GORDON. Beyond micromachining: the potential of diatoms. *Trends in Biotechnology*. 1999, **17**(5). DOI: 10.1016/S0167-7799(99)01321-9. ISSN 01677799.
- [10] LOPEZ, Pascal J, Julien DESCLEÉS, Andrew E ALLEN a Chris BOWLER. Prospects in diatom research. *Current Opinion in Biotechnology*. 2005, **16**(2):

180-186. DOI: 10.1016/j.copbio.2005.02.002. ISSN 09581669. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095816690500025X>

[11] DIATOMITE. [Http://www.mineralseducationcoalition.org](http://www.mineralseducationcoalition.org) [online]. 2014 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.mineralseducationcoalition.org/minerals/diatomite>

[12] Hornická skripta. [Http://www.hornictvi.info](http://www.hornictvi.info) [online]. 2014 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.hornictvi.info/prirucka/razba/rudy.htm>

[13] Alfred Bernhard Nobel. [Http://www.britannica.com](http://www.britannica.com) [online]. 2015 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/416842/Alfred-Bernhard-Nobel>

[14] Explosives - Compositions. [Http://www.globalsecurity.org](http://www.globalsecurity.org) [online]. 2014 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/explosives-compositions.htm>

[15] Geologická encyklopedie. [Http://www.geology.cz](http://www.geology.cz) [online]. 2007 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl>

[16] KORUNIC, Zlatko. Review Diatomaceous earths, a group of natural insecticides. *Journal of Stored Products Research*. 1998, **34**(2-3): 87-97. DOI: 10.1016/s0022-474x(97)00039-8.

[17] Cyklon B. [Http://vtm.e15.cz](http://vtm.e15.cz) [online]. 2014 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://vtm.e15.cz/clanek/cyklon-b-insekticid-ktery-zabil-vic-lidi-nez-hmyzu>

[18] FILLAUDEAU, L., B. BOISSIER, A. MOREAU, P. BLANPAIN-AVET, S. ERMOLAEV, N. JITARIOUK a A. GOURDON. Investigation of rotating and vibrating filtration for clarification of rough beer. *Journal of Food Engineering*. 2007, **80**(1): 206-217. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.05.022. ISSN 02608774. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026087740600416X>

[19] Filtrační křemelina. [Http://filtrace.com](http://filtrace.com) [online]. 2014 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://filtrace.com/clanky-a-odborne-texty/detail/49/filtracni-kremelina-zaziva-ve-vinarstvi-renesanci/>

[20] Fakta o křemelině. [Http://mineralion.cz](http://mineralion.cz) [online]. 2014 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://mineralion.cz>

[21] YILMAZ, Bülent a EDİZ. The use of raw and calcined diatomite in cement production. *Cement and Concrete Composites*. 2008, **30**(3): 202-211. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2007.08.003. ISSN 09589465. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946507001308>

- [22] ZAETANG, Yuwadee, Ampol WONGSA, Vanchai SATA a Prinya CHINDAPRASIRT. Use of lightweight aggregates in pervious concrete. *Construction and Building Materials*. 2013, **48**: 585-591. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.077. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061813006910>
- [23] ÜNAL, Osman, Tayfun UYGUNOĞLU a Ahmet YILDIZ. Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation. *Building and Environment*. 2007, **42**(2): 584-590. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.09.024. ISSN 03601323. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132305004294>
- [24] Diatom. *Il mondo come lo vediamo noi* [online]. 2014 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: biophysics.sbg.ac.at/rovigno/scan/diatom.jpg
- [25] MAPEFLUID N200. *Www.mapei.com* [online]. 2014 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: www.mapei.com/public/CZ/products/mapefluid_n_200_cz.pdf
- [26] Dal Cin. *Www.dalcin.com* [online]. 2014 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.dalcin.com/catalogo/EnoliaEN.aspx?class=12>
- [27] DEGIRMENCI, Nurhayat a Arin YILMAZ. Use of diatomite as partial replacement for Portland cement in cement mortars. *Construction and Building Materials*. 2009, **23**(1): 284-288. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.12.008. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061807003236>

Seznam použitých chemických vzorců

SiO₂	oxid křemičitý
Fe	železo
Ti	titan
P	fosfor
Ca	vápník
Mg	hořčík
Na	sodík
K	draslík
Al₂O₃	oxid hlinitý
CO₂	oxid uhličitý
H₂O	voda
–Si–OH	funkční vazba v silanou
–Si–O–Si–	vazba v siloxanu
SiO₂·nH₂O	opál
C₃H₅N₃O₉	nitroglycerin
C-S-H	kalciump-silikát hydrát
Ca(OH)₂	hydroxid vápenatý (portlandit)
C₃S	alit
C₂S	belit
C₃A	trikalciump-aluminát
C₄AF	brownmillerit
Fe₂O₃	oxid železitý
CaO	oxid vápenatý
MgO	oxid hořečnatý
Na₂O	oxid sodný
Na₂CO₃	uhličitan sodný
K₂O	oxid draselný
SO₃	oxid sírový
ZŽ	ztráta žíháním
RTG	rentgen

DTA	diferenční termická analýza
REM	rastrovací elektronový mikroskop
Obj.	objemový
Hmot.	Hmotnostní
ASR	alkalicko-křemičitá reakce
w	vodní součinitel
TiO₂	oxid titaničitý
P₂O₅	oxid fosforečný

Seznam tabulek

Tabulka 1:	Srovnání rozsivek, jejich stanovišť a faktory, které ovlivňují tvorbu mořských a kontinentálních (jezerních) usazenin křemeliny [2]	16
Tabulka 2:	Srovnání chemického složení mořských a kontinentálních (jezerních) usazenin křemeliny [2]	19
Tabulka 3:	Srovnání fyzikálních vlastností mořských a kontinentálních (jezerních) usazenin křemeliny [2]	20
Tabulka 4:	Světová produkce křemeliny v tisících tun [7] [8]	21
Tabulka 5:	Srovnání mořských a kontinentálních (jezerních) nalezišť křemeliny [2]..	24
Tabulka 6:	Poměr využití křemeliny v USA [%] [5] [6]	25
Tabulka 7:	Chemické složení jednotlivých surovin [%] [21]	30
Tabulka 8:	Mineralogické složení slínku, výpočet dle Bogue [%] [21]	30
Tabulka 9:	Mechanické vlastnosti zatvrdlých malt.....	32
Tabulka 10:	Receptury [22]	35
Tabulka 11:	Fyzikální vlastnosti lehkých kameniv [22]	35
Tabulka 12:	Vlastnosti mezerovitých betonů [22]	36
Tabulka 13:	Chemické složení cementu CEM I 42,5 R (Radotín)	38
Tabulka 14:	Chemické složení křemeliny ENORANDALL 3 [26]	39
Tabulka 15:	Chemické složení křemeliny ENORANDALL 7 [26]	41
Tabulka 16:	Chemické složení křemeliny filtrační F4	43
Tabulka 17:	Sítový rozbor zkušebního křemenného písku	45
Tabulka 18:	Složení cementových malt	46
Tabulka 19:	Výsledné hodnoty pevností v tahu za ohybu	49
Tabulka 20:	Výsledné hodnoty pevností v tlaku	51
Tabulka 21:	Výsledné hodnoty objemových pevností zatvrdlých malt	52
Tabulka 22:	Hodnoty nasákavosti pro jednotlivé receptury	54

Seznam obrázků

Obr. 1	Různé druhy rozsivek [1].....	13
Obr. 2	Rozmanitost tvarů a velikostí frustul [24].....	17
Obr. 3	A - nepoškozená frustula; B - porušená struktura frustuly rozpuštěním [4]....	18
Obr. 4	Snímky z REM; vlevo vzorek s 20 % přírodní křemelina; vpravo vzorek s 20 % kalcinované křemeliny.....	33
Obr. 5	Lehká pórovitá kameniva; zleva: křemelina, pemza, pórobetonový recyklát [22].....	34
Obr. 6	Snímky z REM povrchové struktury kameniv; zleva: křemelina, pemza, pórobetonový recyklát [22].....	34
Obr. 7	Struktura výsledného mezerovitého betonu s křemelinou s rozdílnou dávkou cementového tmele [22]	36
Obr. 8	Mapefluid N200 – technický list [25].....	39
Obr. 9	ENORANDALL 3, snímek z REM, zvětšení 1000× Foto: P. Bayer	40
Obr. 10	ENORANDALL 3, křivka zrnitosti.....	40
Obr. 11	ENORANDALL 3, distribuce částic	41
Obr. 12	ENORANDALL 7, snímek z REM, zvětšení 2000× Foto: P. Bayer	42
Obr. 13	ENORANDALL 7, křivka zrnitosti.....	42
Obr. 14	ENORANDALL 7, distribuce částic	43
Obr. 15	Křemelina filtrační F4, snímek z REM, zvětšení 1000× Foto: P. Bayer	44
Obr. 16	Křemelina filtrační F4, křivka zrnitosti.....	44
Obr. 17	Křemelina filtrační F4, distribuce částic	45
Obr. 18	Graf vývoje pevnosti v tahu za ohybu v závislosti na době zrání a druhu použité křemeliny.....	50
Obr. 19	Graf vývoje pevnosti v tlaku v závislosti na době zrání a druhu použité křemeliny.....	51
Obr. 20	Graf vývoje objemové hmotnosti v závislosti na době zrání a druhu použité křemeliny.....	52
Obr. 21	Referenční malta, snímek z REM, zvětšeno 5000× Foto: P. Bayer	53
Obr. 22	Malta s 10 % křemeliny ENORANDALL 3, snímek z REM, zvětšeno 5000× Foto: P. Bayer.....	53
Obr. 23	Malta s 10 % křemeliny ENORANDALL 7, snímek z REM, zvětšeno 5000× Foto: P. Bayer.....	53
Obr. 24	Malta s 10 % křemeliny filtrační F4, snímek z REM, zvětšeno 10000× Foto: P. Bayer.....	53